

MSC

2.º
CICLO

FCUP
2017

U. PORTO

O Diapiro de Loulé, Estudo Geofísico
do Sal-gema da Mina Campina de Cima

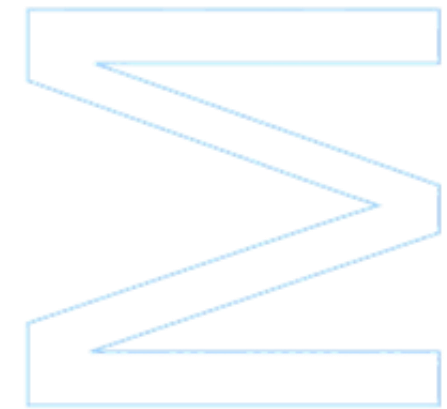
Pedro Manuel Machado Teixeira

FC



O Diapiro de Loulé, Estudo Geofísico do Sal-gema da Mina Campina de Cima

Pedro Manuel Machado Teixeira
Dissertação de Mestrado apresentada à
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto em
Geologia
2017





O Diapiro de Loulé, Estudo Geofísico do Sal-gema da Mina Campina de Cima

Pedro Manuel Machado Teixeira

Mestrado em Geologia

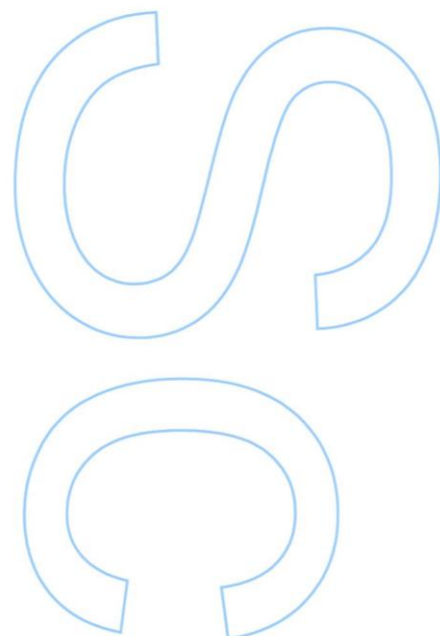
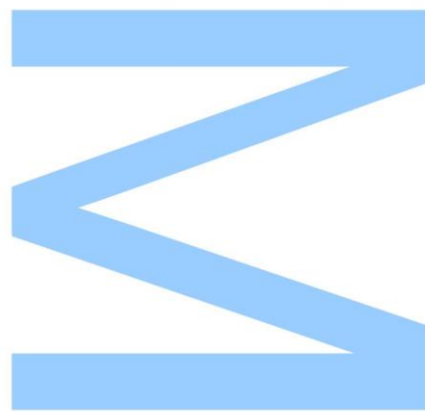
Departamento de Geociências e Ordenamento do Território
2017

Orientador

Rui Moura, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências

Coorientador

Alexandre Andrade, Diretor Técnico da Mina Campina de Cima

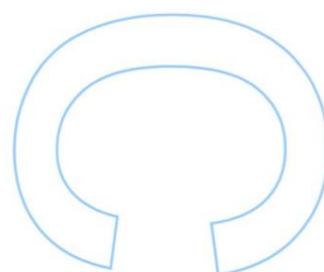
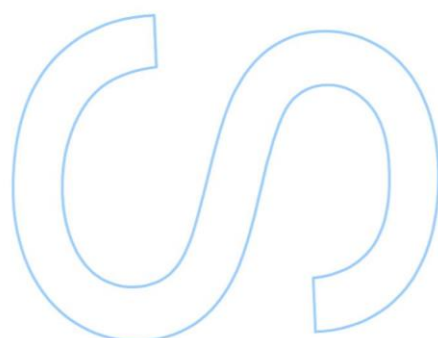
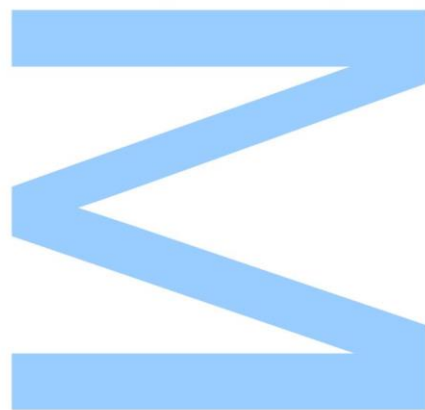




Todas as correções determinadas
pelo júri, e só essas, foram efetuadas.

O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



Agradecimentos

Os meus maiores agradecimentos vão para o meu orientador Rui Moura, por de forma prática me guiar através da geofísica do meu percurso e por me mostrar novos desafios que ajudaram a enriquecer este trabalho, e ao meu coorientador Alexandre Andrade pela sua cooperação, disponibilidade e boa disposição, por me proporcionar uma experiência de trabalho tão agradável na mina de Loulé e por se ter responsabilizado pelo transporte das amostras de sal-gema até à FCUP.

Ao restante pessoal da mina Campina de Cima que me acolheram e com quem tive um contacto mais direto, nomeadamente a Rosa Salvador, Cátia Barradas, Carlos Faísca e em particular a Ezequiel Cristino e Paulo Serra pelo apoio que me deram na realização de algumas tarefas.

À professora Helena Couto pelo apoio que me deu e que me permitiu realizar este estágio, à professora Joana Ribeiro pelos seus preciosos esclarecimentos e à professora Maria dos Anjos Ribeiro também pelo seu apoio e pelas chamadas à atenção que foram o ponto de partida e me permitiram tornar mais consciente acerca dos cuidados a ter no trabalho laboratorial com o sal-gema. Agradeço também a Maria Irene Lopes, responsável pelo equipamento de serragem, pela simpatia e auxílio que me prestou durante o trabalho laboratorial.

Um especial agradecimento a Pedro Terrinha, investigador e responsável pela Divisão de Geologia e Georrecursos Marinhos no IPMA, por todo o trabalho de investigação que realizou sobre o Diapiro de Loulé e apesar de não termos trabalhado juntos como tinha sido pensado no início, mostrou-se sempre disponível em me apoiar da melhor forma. Da mesma forma agradeço a Carlos Ribeiro, professor da Universidade de Évora, pelo apoio que me forneceu.

À minha colega de curso Vanessa Laranjeira pela sua colaboração e assistência no meu trabalho, mas acima de tudo pela sua amizade.

E claro às pessoas que me são mais próximas, da minha família e os meus melhores amigos, que não são necessários nomear e que estiveram sempre presentes durante este longo percurso.

A todos, um obrigado sincero.

Resumo

A Mina Campina de Cima, localizada no interior do diapiro de Loulé, constitui uma oportunidade única de conhecer a estrutura interna de um local que foi vastamente deformado durante a orogenia Alpina. O sal-gema do diapiro, com uma idade de cerca de 230 Ma, apresenta estruturas de deformação espetaculares como dobras em bainha, zonas de cisalhamento e diques de lamprófiros ultrabásicos.

O estudo aqui apresentado pertence a uma proposta de estágio desenvolvida nesta mina com o objetivo de caracterizar geofisicamente o sal-gema ali explorado, ao longo do eixo N-S da exploração. A caracterização do sal-gema foi feita através dos seguintes parâmetros geofísicos: densidade, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, módulo de elasticidade dinâmico, resistividade elétrica e resistência à compressão.

O trabalho prático e laboratorial foi repetido em duas fases separadas, com um aperfeiçoamento dos métodos entre a primeira e a segunda fase. Em cada fase foi realizada uma recolha de amostras no interior da mina, seguida por uma serragem das amostras em provetes normalizados que depois eram submetidos aos ensaios geofísicos em laboratório. Os métodos utilizados em cada ensaio geofísico seguiram as recomendações padrão para a realização dos respetivos testes em rochas como o sal-gema.

Os resultados para o sal-gema estudado foram tratados em separado para os dois conjuntos de provetes analisados nas duas fases. Assim obteve-se uma densidade 2,1 e 2,26 g/cm^3 para o sal-gema. A velocidade de propagação das ondas foi concordante em 4,0 km/s para os dois conjuntos e além disso verificou-se que o sal-gema apresenta anisotropia no âmbito das velocidades das ondas na sua propagação em direções ortogonais. Determinou-se um par de valores teóricos para o módulo de elasticidade dinâmico como sendo 22,13 e 23,72 GPa . A maioria dos valores medidos para a resistividade elétrica situam-se no intervalo de 0,1 a 20 $k\Omega \cdot m$. Nos ensaios de resistência à compressão uniaxial o sal-gema obteve a média de 23,11 e 19,6 MPa .

Através deste estudo conseguiu-se mostrar que no geral o comportamento mecânico do sal-gema ao longo do eixo N-S da mina é relativamente constante nos parâmetros geofísicos analisados. Mas a diversidade na sua apresentação, requer sempre um olhar mais atento aos diferentes detalhes antes da realização de qualquer trabalho mecânico no sal-gema.

Abstract

The Campina de Cima mine, located inside the Loulé salt diapir, provides a unique opportunity to study the internal structure of a place that has been vastly deformed during the Alpine orogeny. The rock salt, with an age of 230 Ma, displays fantastic deformation structures such as curtain folds, shear zones and ultrabasic lamprophyric dykes.

The present study results from an internship proposal developed in the mine with the main objective of doing a mechanical properties characterization of the rock salt explored along the N-S axis of the mine. The characterization was made using the following geophysical parameters: density, ultrasonic pulse velocimeter, dynamic elastic modulus, electrical resistivity and unconfined compressive strength.

The practical and laboratory work was repeated in two separate phases, with an improvement of the methods between the first and second phases. In each phase a sample collection was carried out inside the mine, followed by a sawing of the samples in standard specimens that were then submitted to the geophysical assays in the laboratory. The methods used in each geophysical assay followed the standard recommendations for conducting the appropriate tests on rocks such as rock salt.

The results for the studied rock salt were treated separately for the two sets of test specimens analysed in both phases. Thus, the obtained values for the rock salt density were 2,1 and 2,26 g/cm^3 . The ultrasonic pulses velocity was concordant at 4,0 km/s for the two specimens sets and in addition to that, velocity anisotropy was observed in velocity values in orthogonal propagation directions. A pair of theoretical values for the dynamic elastic modulus was determined to be 22.13 and 23.72 GPa. The range measured for most values of the electrical resistivity were between 0,1 and 20 $k\Omega \cdot m$. In the unconfined compressive strength tests the average values for the rock salt were 23.11 and 19.6 MPa.

In conclusion, this study has made possible to show that in general, the mechanical behaviour of the rock salt along the N-S axis of the mine is relatively constant in the analysed geophysical parameters. But the diversity in its constitution often requires a closer look at the different details before performing any mechanical work on the rock salt.

Palavas Chave

diapiro Loulé, mina Campina de Cima, bacia algarvia, sal-gema, diques lamprófiros, zonas cisalhamento, geofísica, densidade, velocidade ondas ultrassons, módulo elasticidade dinâmico, resistividade elétrica, resistência compressão uniaxial

Key Words

Loulé diapir, Campina de Cima mine, algarve basin, rock salt, lamprophyric dikes, shear zones, geophysics, density, ultrasonic pulse velocimeter, dynamic elastic modulus, electrical resistivity, unconfined compressive strength

Índice

1. Introdução	17
2. Enquadramento geológico e tectónico da Bacia Algarvia	21
2.1 Descrição Geomorfológica	24
3. Estratigrafia da região central da Bacia Algarvia	27
3.1 Carbónico	29
3.2 Triássico – Jurássico Inferior	29
3.3 Jurássico Médio	30
3.4 Jurássico Superior	31
3.5 Cretácico	33
3.6 Plio-Holocénico	34
4. O Diapiro de Loulé	37
4.1 O Sal-gema	43
4.2 Rochas Argilosas e Siliciosas	47
4.3 Diques Lamprófiros Ultrabásicos	48
4.4 Estruturas de Deformação	51
5. A Mina Campina de Cima	61
6. Trabalho Prático e Laboratorial	69
6.1 Recolha das Amostras de Sal-gema	69
6.2 Serragem e Preparação dos Provetes de Ensaio	73
6.3 Caracterização Geofísica em Laboratório	78
7. Métodos de Caracterização Geofísica	81
7.1 Densidade	81
7.2 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassónicas	84
7.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico	88
7.4 Resistividade Elétrica	92
7.5 Resistência à Compressão Uniaxial	100
8. Resultados e Discussão	105
8.1 Densidade	105
8.2 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassónicas	107
8.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico	110

8.4 Resistividade Elétrica	113
8.5 Resistência à Compressão Uniaxial	117
8.6 Análise de Componentes Principais	122
9. Conclusão	125
10. Referências Bibliográficas.....	129
11. Apêndice A – Tabelas de dados dos parâmetros geofísicos.	133

Índice de figuras

Fig. 1 – Localização da Bacia Algarvia na Placa Euroasiática	21
Fig. 2 – Mapa geológico simplificado da Bacia Algarvia com a distribuição dos terrenos de diferentes idades	23
Fig. 3 – Mapa com a localização dos diapiros que constituem o Complexo Evaporítico da Bacia Algarvia	24
Fig. 4 – Localização geral das unidades geomorfológicas do Algarve.....	25
Fig. 5 – Representação de diversos tipos de morfologia cársica que ocorrem na bacia algarvia	26
Fig. 6 – Exemplos geológicos da morfologia cársica presente na bacia algarvia	26
Fig. 7 – Mapa regional da zona central da Bacia Algarvia e legendas.....	28
Fig. 8 – Alguns dos principais fósseis das formações algarvias.....	35
Fig. 9 – Esquematização do processo que leva ao aparecimento de estruturas diapíricas	38
Fig. 10 – Exemplos de diferentes estágios de diapirismo numa bacia de sal	39
Fig. 11 – Mapa topográfico da região em redor do diapiro de Loulé com a rede de falhas existente na área.	40
Fig. 12 – Secções geológicas e fotografias dos afloramentos.....	41
Fig. 13 – Cristais de sal-gema do diapiro de Loulé mostrando a variedade de cores que pode apresentar	44
Fig. 14 – Zonas de sal-gema branco	46
Fig. 15 – Mineralizações encontradas no sal-gema.....	47
Fig. 16 – Diques de lamprófiros ultrabásicos.....	50
Fig. 17 – Zonas e estruturas de cisalhamento.....	52
Fig. 18 – Estruturas de cisalhamento planares isoladas	54
Fig. 19 – Zonas de cisalhamento de estruturas poligonais.....	55
Fig. 20 – Falha de cisalhamento	56
Fig. 21 – Estruturas de deformação causadas por dobramentos	57
Fig. 22 – Secção norte-sul através da mina, a 230 metros abaixo da superfície	58
Fig. 23 – Cavaletes dos poços 1 e 2.....	62
Fig. 24 – Pormenores de locais no interior da mina perto do poço 1	63
Fig. 25 – Mapa da rede de galerias da mina e das estruturas geológicas já mapeadas.....	64
Fig. 26 – Esquema dos processos de ventilação em execução na frente de desmonte	66
Fig. 27 – Elementos do processo de desmonte e da ventilação envolvida.....	67
Fig. 28 – Exemplos de amostras de sal-gema recolhidas	70
Fig. 29 – Sequência de fotografias mostrando o processo de embalamento das amostras de sal-gema na mina	71
Fig. 30 – Recorte do conjunto das câmaras estudado com a marcação dos locais de amostragem nas duas fases	72
Fig. 31 – Equipamento de serragem.....	73
Fig. 32 – Processo de serragem de um bloco de sal-gema em pedaços menores até se obter um provete.....	74
Fig. 33 – Provetes embalados e identificados	76
Fig. 34 – Conjunto dos 32 provetes da segunda série dispostos lado a lado, em fila	77
Fig. 35 – Fotografias das quatro faces do provete 11.1 da Série 2.....	78

Fig. 36 – Esquema de prismas quadrangulares com a identificação das medições para o cálculo do volume	81
Fig. 37 – Equipamento usado para determinar a densidade	83
Fig. 38 – Aparato utilizado nos ensaios da velocidade	86
Fig. 39 – Esquema da aplicação do método dos quatro contactos utilizado nos ensaios de resistividade elétrica	93
Fig. 40 – Aparado do primeiro método experimentado para medir a resistividade elétrica	95
Fig. 41 – Sequência de fotografias mostrando o processo de furar os provetes	96
Fig. 42 – Aparato dos ensaios de resistividade	97
Fig. 43 – Pormenores dos ensaios de resistividade	98
Fig. 44 – Provetes de controlo da absorção da humidade	99
Fig. 45 – Equipamento utilizado nos ensaios de compressão uniaxial	102
Fig. 46 – Exemplos do estado fraturado dos provetes após os ensaios de compressão uniaxial	104
Fig. 47 – Pormenor de gotas de humidade condensada na superfície de um provete de sal-gema	114
Fig. 48 – Provetes onde é visível o comportamento dual que pode ocorrer na presença de estratificação	119
Fig. 49 – Provetes com pequenos veios vermelhos que agiram como pontos frágeis de rutura	119
Fig. 50 – Provetes que obtiveram baixos valores de RCU e cujas fraturas resultaram de vários aspetos	120
Fig. 51 – Provetes que obtiveram valores de RCU superiores a 20 MPa	121

1. Introdução

Ao longo da história da humanidade, o sal tem desempenhado um papel fundamental nas civilizações e culturas de todo o mundo. Foi responsável por estabelecer rotas comerciais, algumas migrações e até pela criação de novas cidades. A sua utilização remonta há cerca de 4000 mil anos no Império da Antiga China, donde datam os primeiros registos a mencionar a exploração deste minério numa sociedade desenvolvida. Adquiriu um fator de peso nas trocas comerciais marítimas levadas a cabo pelos fenícios e até a palavra salário deriva da parcela de sal que os soldados romanos recebiam como pagamento. O sal continua a ser explorado até aos dias de hoje onde a sua importância para a sociedade e para a economia se mantém, apenas os métodos da sua exploração mudaram com o tempo.

A ambição do conhecimento trouxe um desenvolvimento científico que nos permite atualmente estudar e conhecer aspetos e propriedades internas de grande parte do mundo natural. Este trabalho prossegue essa ambição com a realização de um estudo geofísico sobre o sal-gema da Mina Campina de Cima, em Loulé. O diapiro de Loulé situa-se na Bacia Algarvia no sul de Portugal, a sudoeste da Península Ibérica. A região de idade meso-cenozoica tem um historial geológico com diapirismo associado, com os seus episódios mais importantes no Jurássico e Cretácico e também na fase de compressão Alpina, durante o Oligoceno e o Mioceno. É constituída principalmente por rochas sedimentares como calcários marinhos, margas e arenitos que se depositaram desde o Triássico até ao Holocénico e possui também um complexo evaporítico datado do Hetangiano, ao qual pertence o diapiro de Loulé, intercalado com sedimentos siliciosos vulcano-sedimentares. O sal-gema sendo uma rocha especial permite observar a evolução geológica da Bacia Algarvia de uma forma única e como tal tem sido alvo de diversos estudos. Embora a primeira descrição geológica do Algarve tenha sido feita por **Bonnet** em **1850**, é a **Choffat (1887)** que se atribui o primeiro estudo de investigação geológica do território. Depois disso passaram-se longos anos até voltarem a aparecer trabalhos publicados sobre a região, desta vez estudando a estratigrafia, a paleontologia e a geomorfologia entre os quais se destacam duas obras: **Feio (1951)** e **Pratch (1958)**. Foi apenas com o início da cartografia geológica algarvia, levada a cabo pelos Serviços Geológicos de Portugal em 1978, que apareceram assim novos elementos para serem estudados originando assim um crescimento de teses e trabalhos publicados. A obra “400 Milhões de anos de História do Algarve” de **Ramalho (1988)** é um trabalho

essencialmente de divulgação da história geológica do Algarve, como o autor refer, mas que constitui uma interessante introdução de leitura rápida e cheia de informação onde aborda diversos aspetos da evolução geológica do território algarvio. Posteriormente a isso, algumas das publicações mais completas sobre a Bacia do Algarve são **Terrinha (1998)** e **Terrinha et al (2006)** que descrevem a geologia em geral assim como a estratigrafia, a paleogeografia e a evolução tectónica da região e **Almeida (1985)** cujo trabalho se foca na hidrogeologia mas também cobre áreas como a geomorfologia e a climatologia. Como o foco deste trabalho é o sal-gema da Mina Campina de Cima, ele fundamenta-se principalmente em estudos já realizados sobre o diapiro de Loulé onde este minério está a ser explorado. **Terrinha (1989)** realizou um estudo extenso sobre a estrutura interna do diapiro e mais recentemente **Davinson et al (2016)** também se baseou nesse trabalho para aprofundar sobre as estruturas de deformação interna presentes no diapiro. Este estudo segue estes mesmos passos com o objetivo de desenvolver o conhecimento sobre o diapiro de Loulé através da análise de algumas propriedades mecânicas do sal-gema. Grande parte da informação geológica apresentada neste trabalho resulta de uma seleção de informação de diversos trabalhos mas sobretudo das duas publicações acima mencionadas.

O estudo aqui descrito resulta de uma proposta de estágio na Mina Campina de Cima com objetivos de estudo sugeridos pelo Eng.º Alexandre Andrade, atual diretor técnico da mina. O estágio realizado dividiu-se em duas componentes, uma componente de estudo teórico da geologia da região, do diapiro e da mina e outra componente de teor mais prático com vista a caracterizar mecanicamente o sal-gema do diapiro ao longo do eixo de direção N-S da mina. A caracterização proposta tem como base cinco parâmetros geofísicos principais: densidade, velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, módulo de elasticidade dinâmica (módulo de Young), resistividade elétrica e resistência à compressão uniaxial. Através destes parâmetros pretende-se conhecer melhor a geofísica do sal-gema do Diapiro de Loulé.

Os primeiros capítulos desta dissertação baseiam-se no estudo teórico realizado durante o estágio. Apresenta-se primeiro um enquadramento geológico e tectónico sobre a Bacia Algarvia e uma descrição da estratigrafia presente na região. Depois passando para uma escala sucessivamente menor, apresenta-se um estudo da geologia e estruturas de deformação do diapiro de Loulé e do sal-gema e em seguida uma descrição da história e da exploração mineira realizada na mina Campina de Cima.

O trabalho prático consistiu em duas fases, cada uma com três etapas: recolha de amostras, serragem das amostras em provetes e realização dos ensaios

laboratoriais. A recolha das amostras foi realizada ao longo de 1,15 km de uma linha de câmaras centrais da mina e com a sua caracterização pretende-se verificar como os parâmetros em estudo variam ao longo da mina e qual a sua correlação com a variação dos aspetos físicos como a composição do sal-gema, a estratificação e outros. Assim, a segunda parte da dissertação é constituída pela descrição dos métodos geofísicos utilizados na caracterização do sal-gema e pelos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais.

São portanto estes os objetivos deste trabalho: reunir informação geológica sobre o Diapiro de Loulé, produzir dados geofísicos sobre o sal-gema e analisar se existem variações no seu comportamento mecânico ao longo do eixo N-S da mina.

Esta é também uma oportunidade de divulgar um pouco mais à comunidade académica do norte do país, algum conhecimento geológico e geofísico sobre um local de exploração mineira pouco comum em Portugal.

2. Enquadramento geológico e tectónico da Bacia Algarvia

A Bacia Algarvia, ou bacia sedimentar Meso-Cenozoica, localiza-se na zona mais sudoeste da placa continental Euroasiática, na Península Ibérica, como indicada a vermelho na Figura 1 dentro do círculo amarelo. Ainda que atualmente se considere como parte dela, na época da sua formação durante o Mesozoico, a Península Ibérica podia ser considerada uma microplaca, a Ibérica, por se mover de forma relativamente independente sendo controlada apenas pelas placas continentais Euroasiática e Africana com quem fazia fronteira (**Terrinha, 1989**). A formação desta bacia é contemporânea de outras que lhe são vizinhas, no norte de Africa ou na Península Ibérica, como é exemplo a Bacia Lusitana que partilha características de ambiente geotectónico do tipo margem passiva (**Terrinha, 1989**).



Figura 1 – Representação das placas tectónicas numa zona do globo terrestre com ênfase na Placa Euroasiática. O círculo amarelo indica a localização da Península Ibérica e no seu interior, a vermelho, a Bacia Algarvia. (crédito: U. S. Geological Survey)

Muito antes de a Pangeia se tornar um supercontinente, mais precisamente no Carbónico Superior, ocorre a colisão final entre os continentes Gondwana e Laurásia. Esta colisão, que originou a supermassa continental Pangeia, alterou intensamente os sedimentos da região através de dobramentos, fraturas e metamorfismo. A sedimentação marinha que ocorria na região termina no fim do Carbónico e dá lugar a depósitos continentais (**Ramalho, 1988**). A erosão prolongada que se seguiu criou um hiato de cerca de 70 milhões de anos que forma a discordância existente entre as

rochas do Carbónico e os primeiros sedimentos do Triássico Inferior que constituem a Bacia Algarvia (**Terrinha et al., 2006**). Durante o Triássico Inferior e até ao Cretácico Superior, as forças tectónicas que atuavam na altura levaram à fragmentação do supercontinente e a uma nova separação das massas continentais, resultando também na abertura do Mar de Tétis e do Oceano Atlântico (**Terrinha, 1998**). É neste regime distensivo, associado à fragmentação da Pangeia, que se forma a Bacia Algarvia juntamente com o aparecimento gradual, de como hoje são reconhecíveis, as placas continentais como a Africana, Euroasiática e Americanas.

Durante o Jurássico Inferior, o regime de estiramento resultante do processo de fragmentação da Pangeia criou na bacia um conjunto de fraturas de orientação E-W que propiciaram a ascensão de material magmático que é encontrado em todo o território desde Sagres até Vila Real de S. António. É nesta altura que a ocorrência de um afundamento em algumas partes da região provoca a entrada de águas marinhas que conjugado com o clima quente e seco então presente origina a precipitação de enormes quantidades de sal e gesso. É também neste período que se verifica o regresso do mar, que progressivamente vai inundando parte da bacia onde se encontram depósitos de origem marinha. O Jurássico Médio é marcado pelos movimentos de migração das grandes massas de sal, que devido às suas características plásticas quando sujeitas a uma forte pressão, ascendem em direção à superfície através das zonas de fratura. Estes movimentos originaram estruturas salíferas que são comuns na bacia e que são designadas como diapiros (**Ramalho, 1988**).

No Cretácico Superior, mais precisamente no fim do Cenomaniano, deu-se uma inversão tectónica que pôs termo ao regime de bacia do tipo rift sujeita às forças distensivas para dar lugar a um regime convergente. Esta alteração foi consequência da mudança de trajetória do deslocamento da placa Africana em relação à Euroasiática, gerando movimentos de colisão e subducção entre ambas (**Terrinha, 1998; Terrinha et al., 2006**). É também neste período que ocorre a instalação do maciço magmático de Monchique, na zona oeste dos terrenos do Paleozoico. O Cretácico é ainda marcado por três fases de avanço e recuo do nível do mar, onde são claras as intercalações entre erosão continental e deposição marinha (**Ramalho, 1988**). Entre o Mesozoico e o Cenozoico existe outro hiato de mais de 70 milhões de anos desde o Turoniano ao Burdigaliano que corresponde à altura da inversão tectónica e consequente elevação da bacia de rift do Mesozoico (**Terrinha, 1998; Terrinha et al., 2006; Lopes, 2002**). Isto quer dizer que quase todo o Cretácico Superior e todo o Paleogénico estão em falta nos registos geológicos da região.

Os efeitos compressivos resultantes da colisão entre as placas continentais Africana e Euroasiática que se fizeram sentir na Bacia Algarvia perduraram desde o fim do Cretácico até ao Mioceno. Estes efeitos marcam um período conhecido por fase de compressão Alpina, pertencente à Orogenia Alpina, que se sentiu em grande escala durante o Oligoceno e o Mioceno e que marcaram internamente as estruturas da bacia com cavalgamentos N-S e basculamentos. A compressão N-S que se fez sentir nesta altura criou um conjunto de falhas com a direção NE-SW e NW-SE e também dobramentos vergentes para sul. Como consequência, esta rede de falhas deixou a bacia compartimentada em blocos. (Ramalho, 1988; Terrinha, 1998). A Figura 2 apresenta um mapa geológico da Bacia Algarvia na atualidade mostrando os diferentes terrenos e as principais falhas mencionados anteriormente.

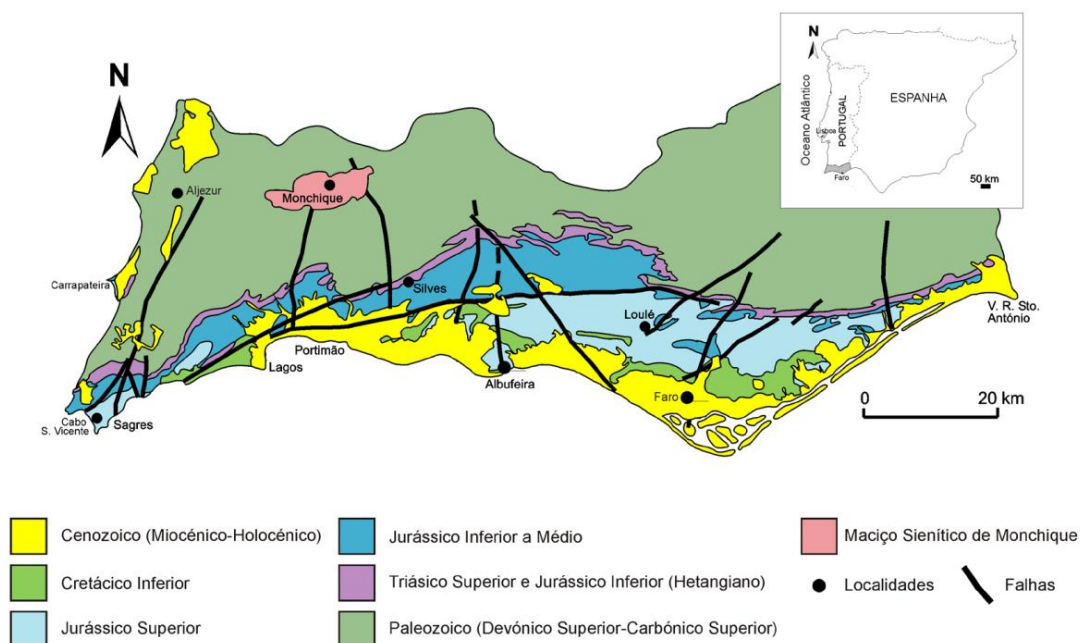


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da Bacia Algarvia com a distribuição dos terrenos de diferentes idades, dentro do território do Algarve (adaptado da folha sul da Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000; Oliveira *et al.*, 1992).

Registos de atividade neotectónica no Holocénico indicam que a Bacia Algarvia volta a estar sob uma compressão N-S. De uma forma geral, toda a estrutura da bacia atual é um monoclinal com duas flexuras principais E-W: a de Sagres-Algoz-Vila Real e a de Albufeira-Guilhim-Tavira (Terrinha, 1998). A Figura 3 mostra os principais alinhamentos das duas flexuras e é de notar como existe uma correlação entre elas e a distribuição das áreas diapíricas presentes na bacia.

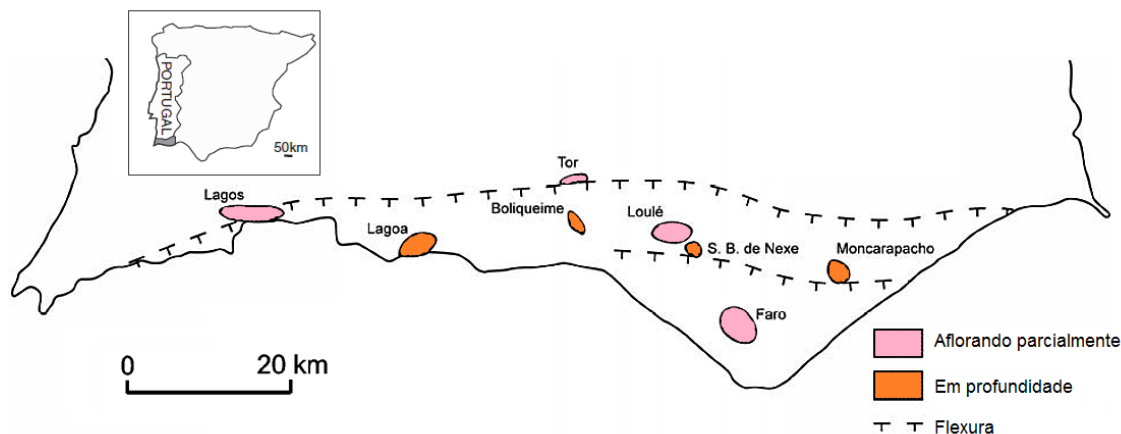


Figura 3 – Contorno da zona sul da região algarvia com representação das duas flexuras principais E-W presentes na bacia. Localização dos diapiros que constituem o Complexo Evaporítico da Bacia Algarvia (adaptado de Ramalho, 1988)

2.1 Descrição Geomorfológica:

A Bacia Algarvia constitui uma província geológica no sul de Portugal com cerca de 140 km de extensão, desde o Cabo de São Vicente até ao Rio Guadiana. A bacia não compreende todo o território algarvio, é constituída somente pelos terrenos Meso-Cenozoicos que assentam em discordância sobre as sequências estratigráficas do Paleozoico da Zona Sul Portuguesa. É composta por duas sequências basais sobrepostas, uma do Mesozoico e a outra do Cenozoico e prolonga-se para o interior de forma irregular variando entre 3 a 25 km de extensão (**Terrinha et al., 2006**). A metade ocidental do Algarve é designada por Barlavento Algarvio e a metade oriental por Sotavento Algarvio, ou somente por Barlavento e Sotavento respetivamente.

Considerando a morfologia em todo o território algarvio é possível observar três unidades geomorfológicas distintas devido à disposição regular de terrenos com características diferentes como a composição e as cores dos sedimentos. Estas zonas são conhecidas como a Serra, o Barrocal e o Litoral. A idade destes terrenos varia gradualmente de forma decrescente desde o interior até à margem costeira, como é possível observar através da Figura 4. **Ramalho (1988)** fornece algumas designações geológicas locais para as diferentes zonas, seguidamente descritas, com base na sua coloração.

A parte interna do Algarve, correspondente ao Paleozoico, é a mais acidentada e a mais antiga e representa a zona da Serra. Atinge altitudes superiores a 400 m a N e a W que decrescem gradualmente para Sul e em direção ao rio Guadiana. É

identificada pelos seus terrenos dobrados e metamorfizados que são constituídos por alternâncias de xistos e grauvaques e por isso designada por “Algarve pardo” pela sua coloração. É apenas interrompida a oeste pelo Maciço de Monchique. Sobre este terreno assentam de forma sucessiva as formações mais modernas do Mesozoico e do Cenozoico, em faixas mais ou menos paralelas à costa.

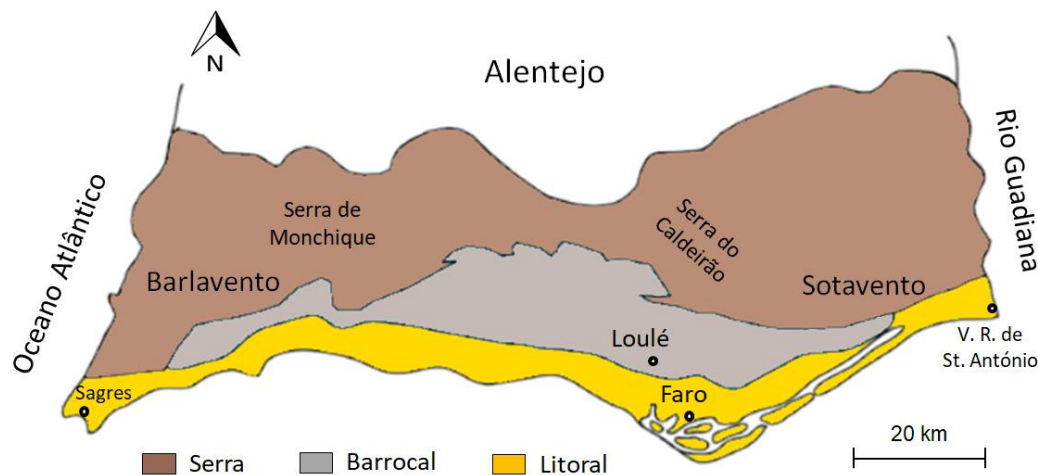


Figura 4 – Localização geral das unidades geomorfológicas do Algarve (adaptado de Dias, 2001)

O “Algarve vermelho”, caracterizado pela coloração avermelhada das margas e arenitos do Triássico que o formam, constitui a faixa de transição da zona da Serra para a zona do Barrocal.

O Barrocal é constituído por calcários e dolomitos do Jurássico que apresentam uma tonalidade acinzentada, constituem por isso o “Algarve cinzento ou de prata”.

A última zona é o Litoral que corresponde à costa e aos depósitos de sedimentos menos coerentes como calcarenitos, arenitos e argilas. Esta zona apelidada de “Algarve dourado” exhibe as suas tonalidades claras em tons quentes de amarelo nas margas e arenitos do Cretácico e do Cenozoico, algo muito evidenciado nas arribas do Sotavento Algarvio.

No aspeto panorâmico, a morfologia e o relevo cársico são os mais abundantes no território algarvio, como é comum em terrenos de rochas carbonatadas. Diversas estruturas ocorrem nos lapiás argalvios tais como relevos pedunculados, dorsos ou agulhas. A Figura 5 mostra uma visão representativa das estruturas cársicas encontradas na bacia. A zona costeira é a que mais visibilidade ganha devido a esta morfologia cársica, ostentando belíssimas estruturas como algares, grutas e arcos.

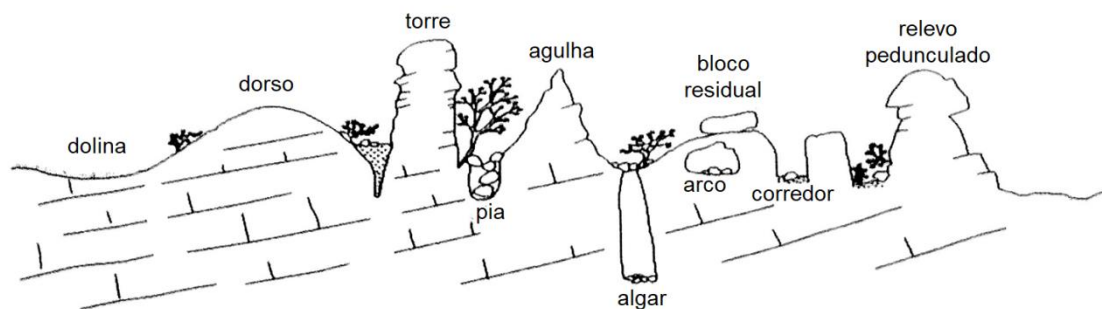


Figura 5 – Representação de diversos tipos de morfologia cárstica que ocorrem na bacia algarvia (adaptado de Crispim, 1982).

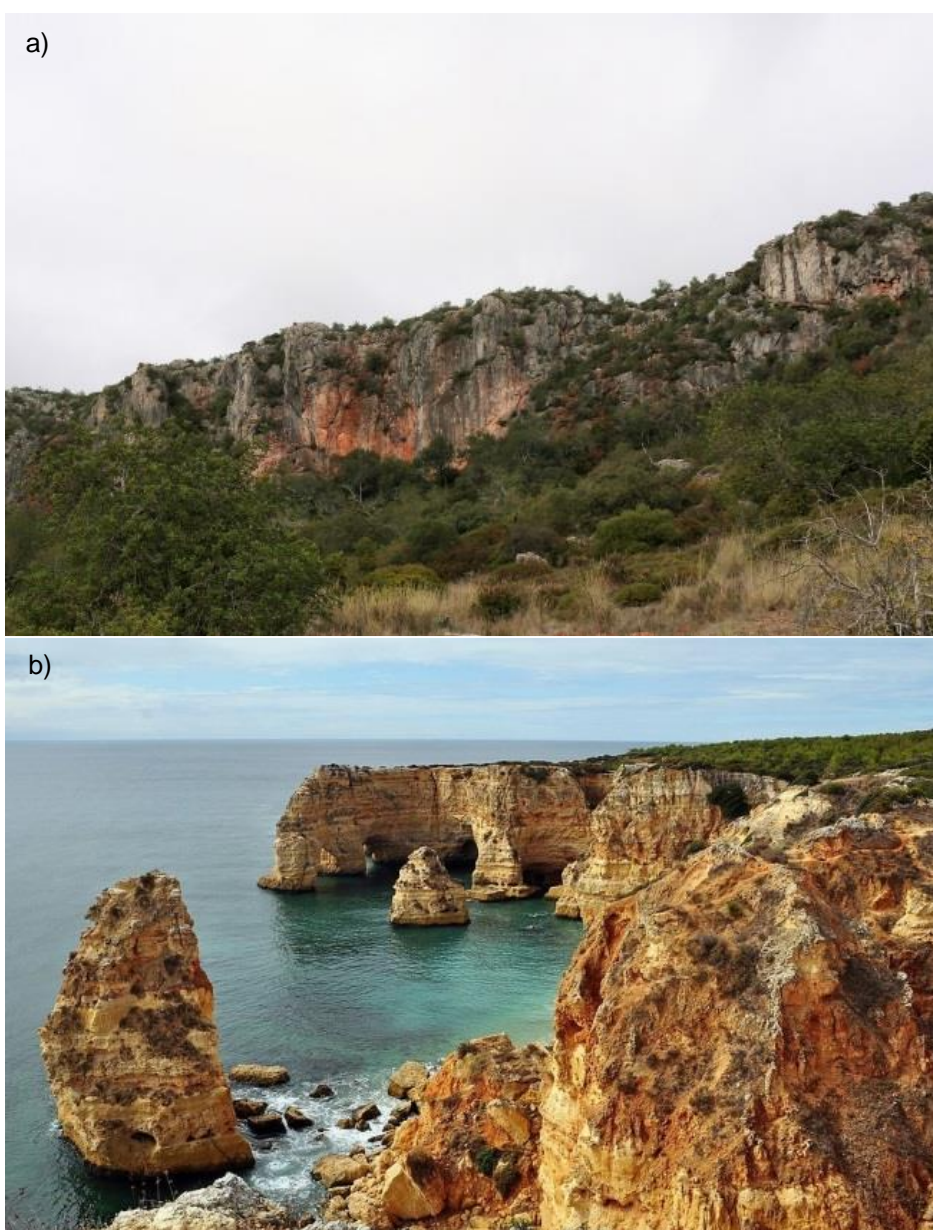


Figura 6 – Exemplos geológicos da morfologia cárstica presente na bacia algarvia. **a)** Rocha da Pena, formação rochosa calcária localizada na zona de transição entre o Barrocal e a Serra Algarvia (crédito: Sérgio Duarte). **b)** Praia da Marinha, reúne várias estruturas cársticas exemplares do Litoral Algarvio (crédito: Klugschnacker).

3. Estratigrafia da região central da Bacia Algarvia

A maioria da informação estratigráfica seguinte foi retirada das Notícias Explicativas das Cartas Geológicas de Portugal da escala 1/200 000 Folha 8 e da escala 1/50 000 Folha 53-A Faro. Pretende-se apresentar aqui as unidades litológicas com as suas características mais gerais, não havendo a pretensão de esta ser um substituto à informação mais detalhada que é fornecida nas notícias explicativas acima referidas. Com base na informação paleontológica fornecida por Ramalho (1988) também se referem alguns dos principais fósseis que se encontram nas várias unidades geológicas e que ajudaram na sua datação.

A estratigrafia aqui apresentada e as suas designações são fundamentadas pela Notícia Explicativa da Folha 53-A Faro atualizada em 2007 com as alterações mais recentes publicadas em algumas obras sobre a região. Essas alterações incluem o nome de algumas formações e de algumas designações das unidades. Por exemplo as anteriores designações das unidades do Jurássico eram representadas de J¹ a J⁵, mas a nova alteração representa-as como J¹, J² e J³ com a numeração correspondente às épocas do Jurássico: Inferior, Médio e Superior respetivamente, sendo depois acompanhadas com uma ou duas letras correspondentes às iniciais do nome da formação.

Além disso, também a língua portuguesa foi alvo de modificações com o novo Acordo Ortográfico. As palavras que mais são alvo de confusão são os nomes dos andares geológicos para as quais existem algumas variações. Como tal, utilizou-se o Dicionário Infopédia da Língua Portuguesa com Novo Acordo Ortográfico da Porto Editora, de forma a validar os termos aqui usados.

A Figura 7 contém o mapa da região central da Bacia Algarvia e a respetiva legenda. A simbologia inserida no mapa contém as designações antigas assim também como o texto em inglês, que não são possíveis de alterar sem danificar o mapa, tal como se apresenta em **Davinson et al. (2016)**. O quadro com a descrição das unidades litológicas contém as designações antigas e as novas designações de forma a facilitar a sua correspondência.

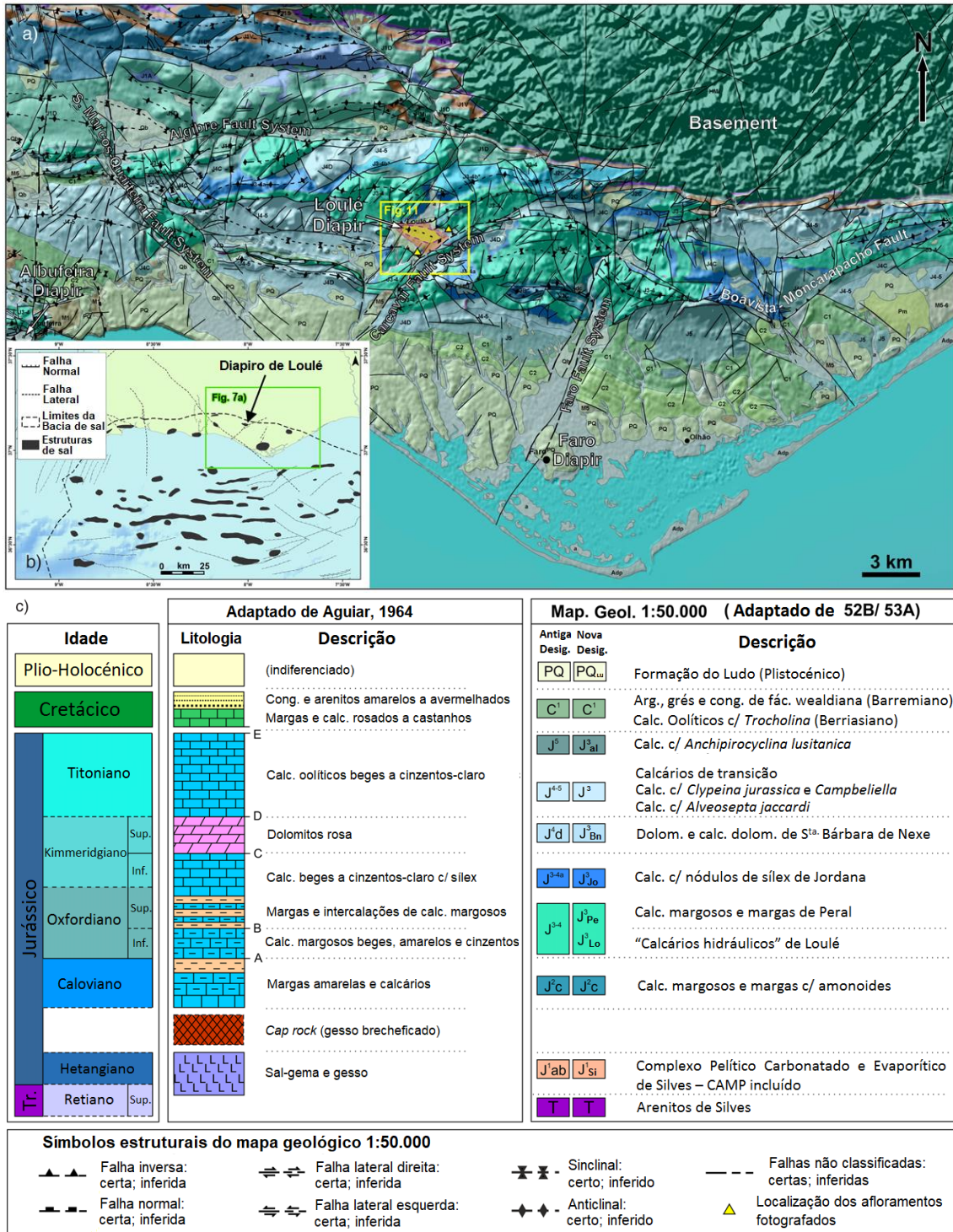


Figura 7 – **a)** Mapa regional da zona central da Bacia Algarvia. A caixa amarela indica a área deste estudo e corresponde à área do mapa da Figura 11; **b)** Mapa da região da Bacia Algarvia e de todas as estruturas salíferas conhecidas na zona. A caixa verde mostra a localização do mapa regional com a indicação do Diapiro de Loulé; **c)** Legenda para o mapa regional e para a secções geológicas das Figuras 12a e 12b. (Modificado de Aguiar, 1964; Rocha *et al.*, 1980, 1989; Manuppella *et al.*, 1987; e Oliveira, 1987-1988, 1992; em Davinson *et al.*, 2016)

3.1 Carbónico

Estratigraficamente, a bacia assenta em discordância sobre rochas do tipo *flysch* do Carbónico. Estas rochas são xistos e grauvaques em alternância que sofreram deformação e metamorfização de baixo grau durante a orogenia varisca (**Manuppella, 1988; Oliveira, 1990**). Por vezes encontram-se também intercalações de conglomerados. O conjunto de rochas deste período ultrapassa os 2 km de espessura. Originalmente, antes de serem metamorfizados, eram alternâncias de vasas e areias finas que se depositaram ao longo dos taludes marinhos. A forte erosão que sofreu deixou a área aplanada e com um hiato no registo geológico entre o Carbónico Inferior e o Triássico, acima da qual se depositaram as unidades seguintes. A presença de fósseis é relativamente baixa mas entre os existentes as goniatites são os mais comuns e indicam um ambiente de mar largo (Figura 8a) (**Ramalho, 1988**).

3.2 Triássico – Jurássico Inferior:

A primeira unidade de sedimentos conhecida da bacia é formada por depósitos continentais de tonalidade avermelhada, essencialmente constituída por sedimentos detríticos, evaporitos e rochas eruptivas básicas. Esta unidade foi nomeada por **Choffat (1887)** como Formação Grés de Silves que mais tarde foi subdividida em três sequências estratigráficas que marcam episódios importantes de deposição (Arenitos de Silves e Complexo Pelítico Carbonatado e Evaporítico de Silves) e de vulcanismo (Complexo Vulcano Sedimentar). Nesta descrição a sequência vulcânica encontra-se inserida na descrição do Complexo Pelítico Carbonatado e Evaporítico por na região em causa as duas se encontrarem muitas vezes intercaladas.

Triássico – Hetangiano

T – Arenitos de Silves

A primeira sequência é conhecida pelo nome de Arenitos de Silves e são na sua maioria argilas e conglomerados na base, datados do Triássico Inferior, seguindo-se por arenitos, siltitos e xistos, datados do Triássico Superior no topo. De um modo geral apresentam uma fácies avermelhada de ambiente fluvial ou aluvial e também de um ambiente lacustre pouco profundo. A sua espessura é variável e oscila entre os 30

e os 60 m (**Palain, 1976; Rocha, 1976**). Os organismos fósseis mais característicos desta sequência são os estegocéfalos que eram braquiópodes de grande porte (Figura 8b) e pequenos crustáceos bivalves do género *Estheria* (Figura 8c) (**Ramalho, 1988**).

J¹_{Si} – Complexo Pelítico Carbonatado e Evaporítico de Silves – CAMP incluído

O Complexo Pelítico Carbonatado e Evaporítico de Silves, ou Complexo Margo-Carbonatado de Silves como também é conhecido, assenta sobre os Arenitos de Silves sem discordância aparente. A sua idade vai do Triássico Superior até ao Hetangiano (Jurássico Inferior) no topo da sequência e resultou de uma incursão marinha acerca de 200 milhões de anos. Esta unidade é constituída por pelitos de coloração avermelhada, calcissiltitos finamente estratificados e arenitos, que vão dando lugar a carbonatos essencialmente dolomíticos até ao topo. Por cima destas litologias encontram-se depósitos evaporíticos de sal-gema e gesso que se encontram intercalados com rochas vulcânicas associadas com a Província Magmática do Atlântico Central (CAMP). (**Palain, 1976, 1979; Rocha, 1976; McHone, 2000; Martins et al., 2008**). Estas rochas de origem magmática, principalmente basaltos e tufos, têm um carácter toleítico continental e estão relacionadas com o processo distensivo associado com a formação do rift do oceano Atlântico que ocorria na altura (**Fernandes e Rosendahl**). Um constituinte importante nesta sequência são as margas gipsíferas que constituem o *cap rock* das extrusões diapíricas de Loulé e Faro. A deposição desta sequência cobriu por completo as bacias *half-graben* formadas anteriormente (**Barreto et al., 2015**).

3.3 Jurássico Médio

O *Dogger* aflorante do Sotavento Algarvio já foi referido por diversos autores. É constituído por quatro unidades mas apenas o Caloviano está presente na área da região em estudo. Os sedimentos desta época ocorrem principalmente no interior de estruturas anticlinais no sector do Sotavento. A raridade de fósseis presente dificulta a datação das sequências deste período.

Caloviano

J²_C – Calcários margosos e margas com amonoides

Atualmente esta unidade designa-se por Formação de Telheiro e apresenta uma espessura de cerca 50 m. É composta por uma sucessão de margas amareladas e calcários margosos a arenosos com raros amonoides. A associação com os amonoides permitiu datar esta formação como do Caloviano inferior (zona de *Macrocephalites*) (Manuppella et al., 1987). A localização desta formação observa-se quase sempre no seio de estruturas diapíricas ou em dobras de grande raio, resultantes das fases compressivas. Assenta sobre as unidades anteriores em uma discordância muito angular.

3.4 Jurássico Superior

Os sedimentos do Jurássico Superior assumem uma maior expressão na zona central da bacia. Dois dos fósseis mais comuns encontrados nas formações desta época são de algas dasicladáceas (Figura 8d) e rostros de belemnites (Figura 8e) (Ramalho, 1988).

Oxfordiano – Kimmeridgiano Inferior

J³_{Lo} – “Calcários hidráulicos” de Loulé

São calcários um pouco argilosos e por vezes betuminosos de estratificação regular e toda a unidade possui cerca de 60 m de espessura. Estes calcários são na sua maioria micrites e pelcrites, com espículas de espongiários, “filamentos”, ostracodes finos e raramente pequenos foraminíferos.

J³_{Pe} – Calcários margosos e margas de Peral

Com cerca de 100 m de espessura esta unidade assenta sobre os “Calcários Hidráulicos” de Loulé ou diretamente sobre o Caloviano inferior. A sua constituição é uma alternância entre calcários margosos compactos acinzentados e margas cinzentas. Os calcários são principalmente pelcrites com pequenos grãos de quartzo e glauconite, fragmentos lenhitosos, espículas de espongiários, “filamentos”, crinoides e

raramente pequenos foraminíferos. Têm na sua constituição belemnites, amonites, espongiários e restos vegetais fossilizados.

J³_{Jo} – Calcários com nódulos de sílex de Jordana

Esta unidade está compreendida entre Albufeira e Tavira e possui uma espessura variável que pode atingir os 160m. Na sua composição contém calcários margosos compactos de tonalidade cinzento-escura e com nódulos de sílex. Dispõem-se em bancadas médias e com a presença de silificações secundárias de cor castanha. Estes calcários são na sua essência pelágicos com alguma presença de elementos bioclásticos finos. A fauna fóssil encontrada (espongiários, corais, equinodermes, lamebrânquios, etc) apresenta-se muito fragmentada e silificada no entanto algumas associações faunísticas permitiram a sua datação como pertencente ao Kimmeridgiano inferior (Marques, 1983).

J³_{Bn} – Dolomitos e calcários dolomíticos de S^{ta} Bárbara de Nexe

A ausência de fosseis e os limites heterócronos não permitem datar esta unidade com precisão, apenas por equivalência lateral e pelas relações das unidades limítrofes. É constituída por camadas com grande espessura de dolomitos e calcários dolomitizados com uma tonalidade creme rosada. A unidade corresponde provavelmente à dolomitização secundária das unidades calcárias vizinhas e observa-se unicamente a oeste de Faro.

Kimmeridgiano – Titoniano

J³ – Calcários com *Alveosepta jaccardi*, Calcários com *Clypeina jurassica* e *Campbeliella striata* e Calcários de transição

A unidade Calcários com *Alveosepta jaccardi* corresponde a calcários margosos e margas com oncólitos, nerineias e pequenos rudistas primitivos. Os calcários são na sua maioria biocrinites, às vezes interclásticos ou com grãos finos de quartzo. Possui uma espessura máxima de 180 m e dos vários microfósseis presentes salienta-se a *Alveosepta jaccardi*.

Os calcários com *Clypeina jurassica* e *Campbeliella striata* variam entre compactos a nodulares, um pouco margosos e com abundante presença de nerineias e oncólitos. São principalmente bio e intramicrites muitas vezes dolomitizadas e salienta-se a presença de *Clypeina jurassica* e *Campbeliella striata* entre os micro-

organismos presentes. Estão datados como do Kimmeridgiano superior e a sua espessura varia entre 150 a 200 m.

Os calcários de transição são assim chamados por do ponto de vista micropaleontológico fazerem a transição para a unidade seguinte. São constituídos por calcários compactos e margosos nodulares. Essencialmente são bio e intramicrites frequentemente dolomitizadas. A sua espessura é de 100 m e está datada como do Titoniano inferior.

Titoniano P. P.

J³_{al} – Calcários com *Anchispirocyclus lusitanica*

São calcários compactos nodulares muitas vezes interclásticos e oolíticos com passagens de “calhaus negros”, alternando com calcários margosos e margas em bancos médios a espessos. Os calcários são bio, intra e oomicrites por vezes dolomitizados com um conteúdo de microfósseis muito diversificado que inclui a *Anchispirocyclus lusitanica*. A sua espessura é cerca de 120 m e está datada como do Titoniano (Portlandiano B).

3.5 Cretácico

As unidades deste período não formam um afloramento contínuo como as do Jurássico, mas ainda assim constituem uma faixa da bacia de grande espessura que assenta sobre o Titoniano em continuidade estratigráfica. Das várias unidades desta série apenas duas se encontram presentes na área em estudo. Um dos organismos fósseis encontrados nesta série é a Orbitolina (Figura 8f) (Ramalho, 1988).

Berriasiano - Barremiano

C¹ – Calcários oolíticos com *Trocholina*; Argilas, grés e conglomerados de fácies wealdiana;

Os calcários oolíticos são calciclásticos, gresosos, com tons amarelos e rosados, esparíticos e com oncólitos. Tem uma espessura total de 27 m e entre os seus microfósseis possui *Trocholina gr. elongata-alpina*.

A sequência de argilas, grés e conglomerados de fácies wealdiana tem uma espessura de 75 m e é composta por conglomerados siliciosos, grés finos e grosseiros

com estratificação obliqua e também por argilas com tonalidades que variam entre violáceo, verde e vermelho.

3.6 Plio-Holocénico

Esta série contém as formações mais recentes da bacia e aquelas que cobrem a maior área de superfície. A sua distribuição encontra-se ao longo de quase toda a costa.

Plio-Plistocénico

PQ_{Lu} – Formação do Ludo

A Formação do Ludo, anteriormente denominada por Areias de Faro-Quarteira (**Manuppella et al., 1987**) tem a cobertura mais extensa da Bacia Algarvia e assenta sobre a maioria dos terrenos anteriores. A sua espessura é muito variável e não ultrapassa os 70 m. Pelas alterações recentes nas obras publicadas, esta formação é agora composta por cinco unidades: Areias da Falésia, Areias de Monte Negro, Areias de Quarteira, Areias do Ludo e Areias e cascalheiras de Gambelas (**Moura e Boski, 1999**). De uma forma geral ela é composta por areias predominantemente de grão médio a fino podendo apresentar-se com granulometria mais grosseira em alguns locais. Também possui na sua composição sedimentos feldspáticos arenosos e de argila. Em alguns lugares são encimadas por cascalheiras com seixos rolados de quartzo, quartzito e grauvaque, principalmente. As tonalidades dos sedimentos são no geral claras e variam entre branco, amarelo, laranja e rosa. Os sedimentos desta unidade correspondem no geral a um ambiente fluvial apresentando-se também com intercalações de sedimentos que sugerem ambiente marinho.

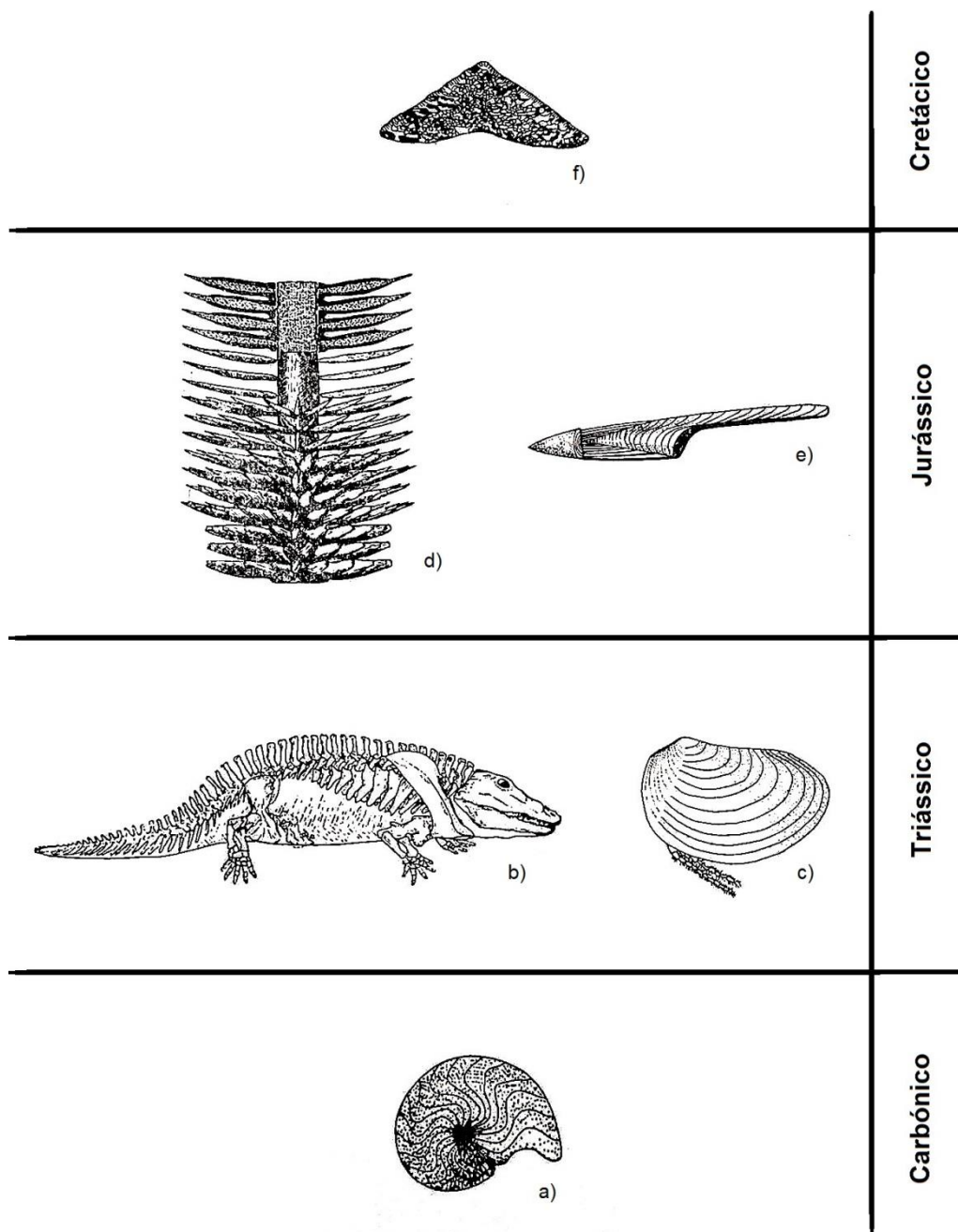


Figura 8 – Alguns dos principais fósseis das formações algarvias. O tamanho relativo dos fósseis é indicado entre parêntesis a seguir ao nome. **a)** Goniatite (x0,5); **b)** Batráquio estegocéfalo (x0,05); **c)** *Estheria* (x6); **d)** Dasicladácea em esquema e em corte (x11); **e)** Rostro de belemnite (x0,6); **f)** Orbitolina, secção axial mostrando a estrutura interna (x7); (Fonte: Ramalho, 1988)

4. Diapiro de Loulé

O diapiro de Loulé e as estruturas a ele associado fazem parte do conhecimento geológico nacional desde há muito tempo. Quando os Serviços Geológicos de Portugal fizeram a cartografia geológica à escala 1/50 000, esta estrutura já constava nesse projeto bem assim como em todas as outras cartografias realizadas a seguir. A sua classificação litoestratigráfica é por vezes encontrada em alguma bibliografia como incluída numa unidade antiga designada por Formação Dagorda. Esta formação corresponde ao Hetangiano e a parte do Triássico e representa as formações diapíricas na região. Atualmente, a Folha 53-A Faro (2006) e a respetiva notícia explicativa atualizada (2007) não contêm essa designação, referindo a litologia do diapiro como “Gesso e Sal-gema” e encontrando-se este incluído na sequência do Complexo Pelítico Carbonatado e Evaporítico de Silves.

O processo de formação do diapiro é interpretado com base na tectónica do sal (*salt tectonics*) que estuda os processos associados à presença de evaporitos, como o sal-gema, no interior das unidades geológicas. Uma categoria da tectónica de sal é a halocinética (*halokinesis*) que estuda os movimentos das massas de sal e o seu alojamento dentro de uma sequência de rochas, assim como as estruturas dos corpos de sal resultantes.

A deposição da massa de sal do complexo evaporítico deu-se no Hetangiano e está associada a um período em regime de *rifting* onde predominaram fenómenos distensivos, como mencionado anteriormente no enquadramento. A ocorrência de atividade vulcânica contemporânea confere a estes depósitos um carácter vulcano-sedimentar. Com o aumento da pressão que os sedimentos que se vão sobrepondo originam, o comportamento do sal torna-se plástico e este começa a deslocar-se por ação dos movimentos tectónicos e ascende em direção à superfície por entre as sequências de rochas. A ascensão nesta região ocorreu no Jurássico Médio e deu-se por entre zonas frágeis como falhas e originou estruturas profundas designadas por cordilheiras de sal-gema (*salt ridges*). Estas cordilheiras cresceram em certos pontos e ascenderam de tal forma a originar estruturas de grandes dimensões como domos de sal, como é o caso do diapiro de Loulé. Dos estudos efetuados, pensa-se que a cordilheira profunda que originou este diapiro situa-se a uma profundidade de mais de 2 km e que se estende por pelo menos 10 km com 2 km de largura. A Figura 9 mostra uma esquematização do processo que leva ao aparecimento de estruturas diapíricas resultantes da pressão de carga sobre uma camada de evaporitos de espessura

uniforme. O diapiro teve um crescimento contínuo durante o Jurássico e até ao meio do Cretácico juntamente com a formação de sinclinais como mostram estudos com perfis de reflexão sísmica (**Matias, 2007; Matias et al., 2011; Ramos et al., 2014**). Isto resultou na formação de dobras em bainha com eixo sub-vertical com comprimentos de onda na ordem dos 0,5 a 10 m (Fig. 22 e Fig. 21).

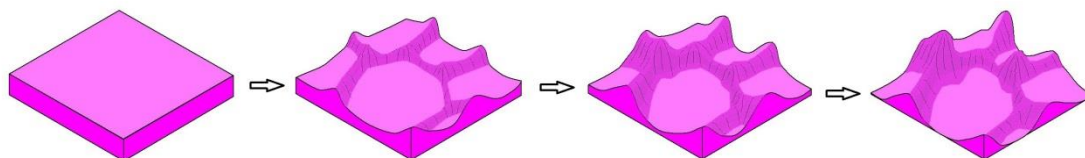


Figura 9 – Com o aumento da pressão de carga sob uma camada uniforme de evaporitos, o sal começa a ascender formando redes de cordilheiras cada vez mais altas. O sal flui das zonas baixas, diminuindo a espessura inicial da camada e entra por entre as sequências de rochas que o sobrepõe, geralmente através de pontos de fraqueza como zonas de falha. A ascensão contínua de material dá origem a estruturas como os domos de sal. (Crédito: Mike Norton)

Quanto à sua geometria, o diapiro aparenta ter uma forma mais ou menos elipsoidal tendo o seu eixo maior de orientação WNW-ESE pelo menos 5 km ao nível do solo. Lateralmente é limitado por uma falha de cavalgamento com tendência E-W ao longo da margem norte e por um deslizamento oblíquo de tendência NE-SW da Falha de Carcavai ao longo da margem SE. A margem norte do diapiro tem uma inclinação de 30° para N e a sua margem sul inclina 60° para S, indicando que as paredes inclinam “para fora” ao nível da mina. O seu topo está situado ao longo de uma dobra anticlinal regional. Originalmente o diapiro teria uma forma mais esferoidal mas devido à compressão Alpina que atuou na direção do seu eixo E-W, o diapiro adquiriu uma forma esticada ao longo do seu eixo N-S. A Figura 10 mostra uma representação das estruturas que se formam pela ascensão do material evaporítico com o diapiro de Loulé a corresponder a uma estrutura em domo.

Nos tempos atuais, o diapiro encontra-se encaixado entre as sequências de calcários e dolomitos do Jurássico e sobre o seu topo gerou-se uma depressão plana causada pela dissolução do sal. Esta depressão foi preenchida por sedimentos do Plio-Holocénico pertencentes à Formação do Ludo e atingem uma espessura de cerca de 80 m. Nas camadas de carbonatos do Jurássico situadas ao redor do diapiro encontram-se muitas falhas normais. Estas falhas em geral inclinam para longe do diapiro e apresentam deslocamentos até várias centenas de metros. A causa de

algumas dessas falhas pode ter-se devido ao colapso provocado pela dissolução do sal que é indicada pela presença de um *cap rock*.

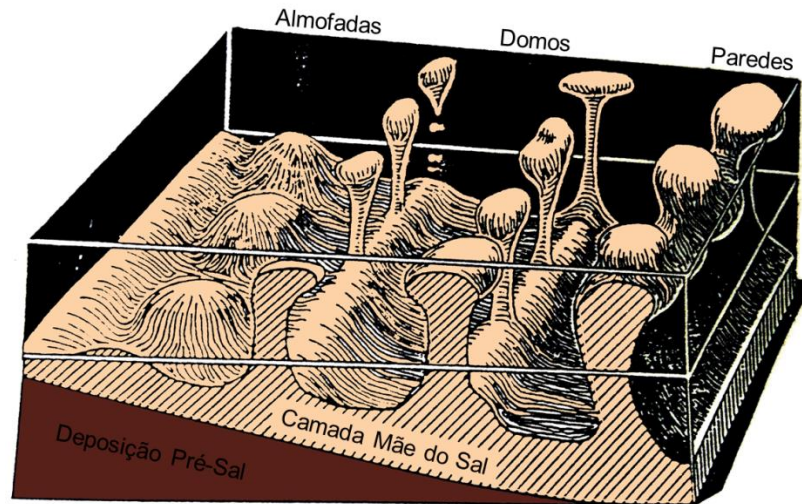


Figura 10 – Exemplos de diferentes estágios de diapirismo numa bacia de sal. Conforme o material evaporítico vai ascendendo a partir da camada mãe do sal forma estruturas características como almofadas de sal, domos de sal e paredes de sal. A apresentação inclinada da camada de sal é propositada para mostrar o controlo que a profundidade a que esta se encontra, tem sobre o início do diapirismo. (adaptado de Terrinha, 1989)

O *cap rock* (Fig. 15d) representa a parte superior do diapiro e resultou da dissolução do sal-gema, é constituído essencialmente por gesso e anidrite brechificados. Durante os movimentos de dobramento envolveu brechas de outros materiais que ficaram incluídos no gesso, encontrando-se atualmente num estado muito contorcido. Essas inclusões são fragmentos de diques de rocha ultrabásica e de calcários dolomíticos que se assemelham aos do Kimmeridgiano, que muito provavelmente foram arrancados às paredes dos flancos do diapiro durante a sua ascensão. O *cap rock* envolve o topo e os bordos do diapiro e atua como um impedimento para a passagem de água dos aquíferos para o interior do diapiro, evitando assim a sua dissolução. A presença deste *cap rock* brechificado com uma espessura de quase 200 m sobre o topo do diapiro é a prova dessa dissolução. A tamanha espessura do *cap rock* implica que uma enorme quantidade de sal com provavelmente vários quilómetros de espessura foi dissolvida para deixar todo este resíduo que forma o atual *cap rock* do diapiro. Esta dissolução em larga escala também é indicada pela presença isolada de um bloco de rochas carbonatadas de idade do Jurássico que se encontra no topo do diapiro e que localmente tem o nome de Monte de Cabeço do Mestre (visível na secção geológica IV). Portanto é provável

que o diapiro de Loulé em algum ponto da sua história tenha estado exposto ou apenas próximo do leito marinho ou do nível do solo.

O mapa topográfico seguinte mostra a zona em redor do diapiro de Loulé e foi construído com informação da superfície e subterrânea. Os contornos estruturais pertencem aos níveis calcários do Caloviano superior. A localização de seis secções geológicas feitas por **Aguiar (1964)** está assinalada no mapa por um tracejado cinzento, cada uma identificada por numeração romana. As respetivas secções são mostradas na Figura 12 juntamente com os afloramentos fotografados de dobras à superfície. Também marcados no mapa estão os poços de prospeção realizados na área antes da abertura da mina de sal-gema

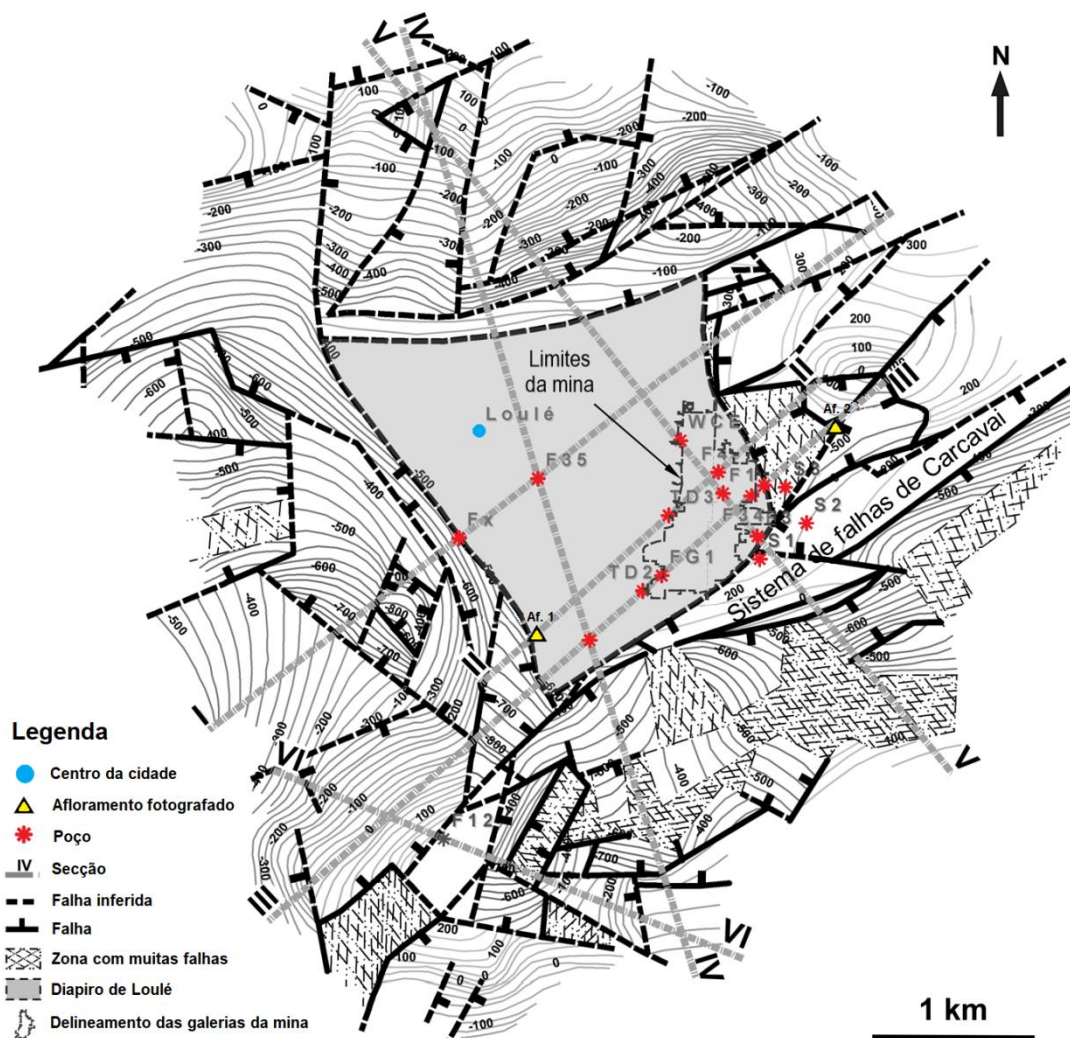


Figura 11 – Mapa topográfico da região em redor do diapiro de Loulé com a representação da rede de falhas existente na área. Os locais dos afloramentos fotografados e dos poços de sondagem realizados também estão marcados assim também como a localização das secções geológicas realizadas. (adaptado de Aguiar, 1964; em Davison *et al.*, 2016)

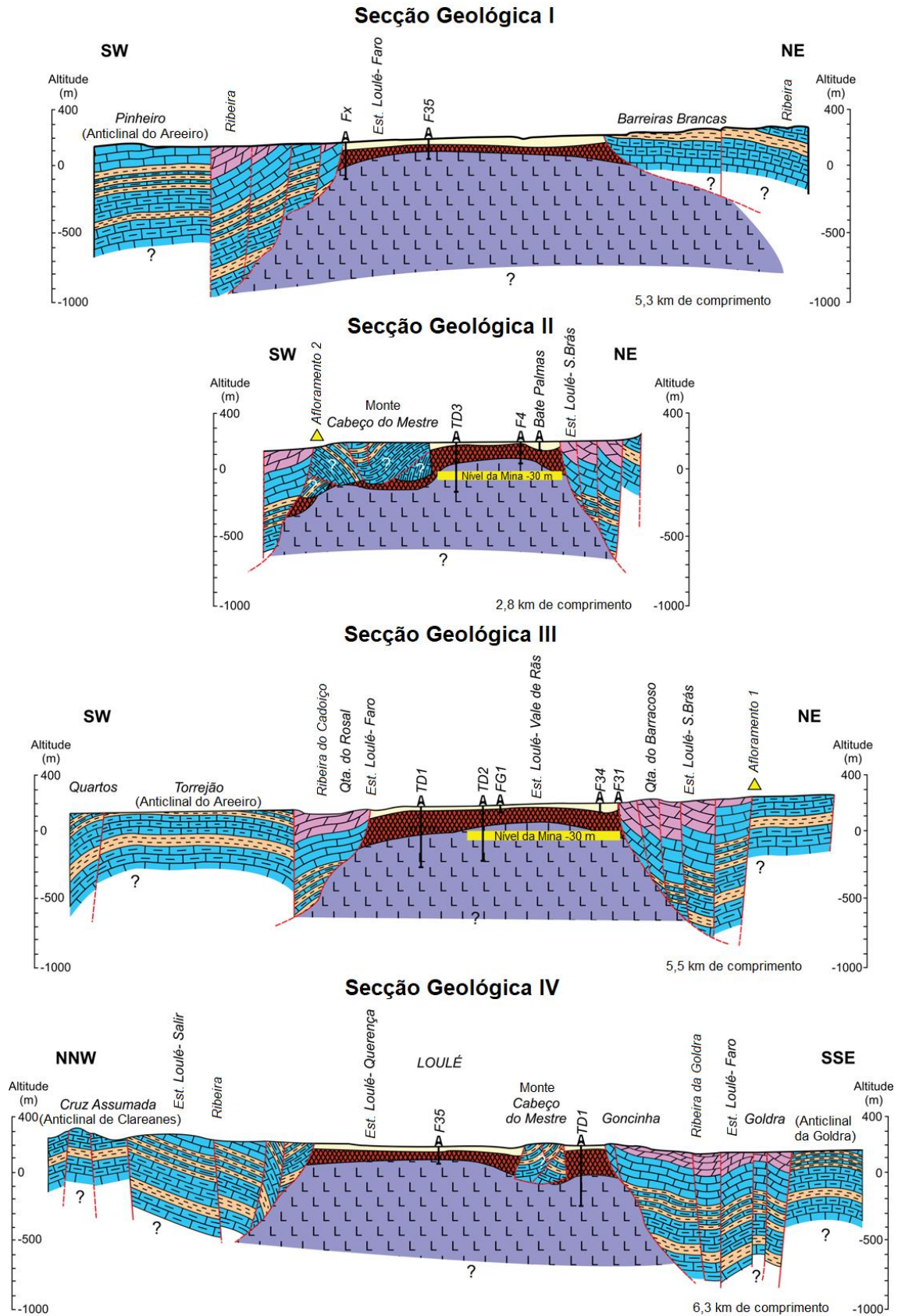


Figura 12a – Secções geológicas realizadas na área do diapiro de Loulé com base na informação obtida a partir de afloramentos e dos poços de prospeção. A localização das secções está na Figura 11. A legenda das unidades litológicas encontra-se na Figura 7. (adaptado de Aguiar, 1964; em Davison *et al.*, 2016)

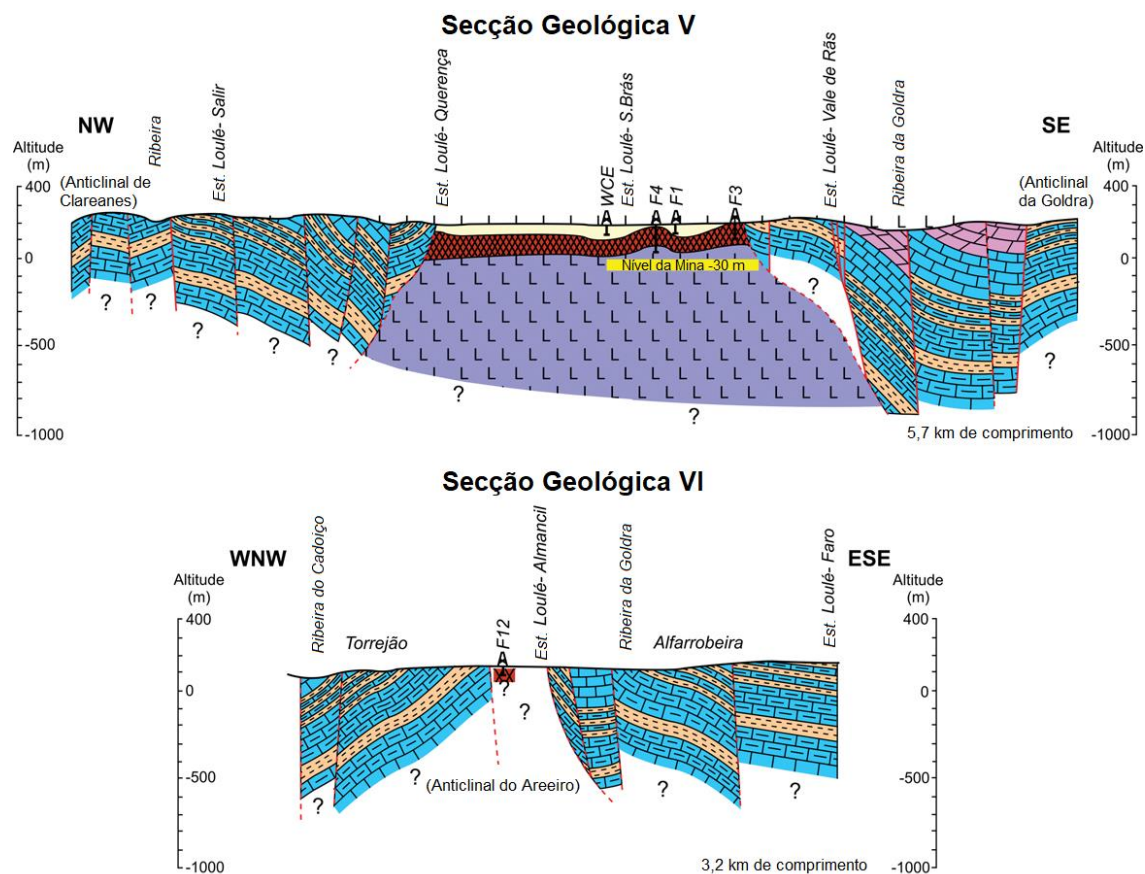


Figura 12b – Continuação das secções. As fotografias 1) e 2) mostram dobras à superfície e são o afloramento 1 na secção III e o afloramento 2 na secção II, respetivamente. A localização dos afloramentos também está marcada no mapa da Figura 11. (adaptado de Aguiar, 1964; em Davison *et al.*, 2016)

Nas secções são visíveis os dobramentos das unidades geológicas em redor do diapiro caudados pela deformação Alpina com uma tendência geral E-W. Exemplos dos dobramentos representados nas secções são o anticlinal do Areeiro (secções I, III e IV), o anticlinal da Goldra (secção IV) e o sinclinal Cabeço do Mestre (secção II). Nos afloramentos fotografados ainda é possível observar esses dobramentos nas sequências de rochas carbonatadas. Como a área está cheia de falhas, observam-se várias descontinuidades nas sequências de carbonatos. Nas secções II, III e V aparece a representação do primeiro nível da mina Campina de Cima dentro do diapiro, à cota de -30 m. Na secção II em particular compreende-se melhor a sua localização, estando inserida numa zona do diapiro que encontra o *cap rock* no extremo norte e no extremo sul da mina.

4.1 O Sal-Gema

Sal-gema é o material constituinte do diapiro e é a designação dada à rocha de sal. O principal constituinte do sal-gema do diapiro de Loulé é a halite (NaCl). Em termos percentuais a halite perfaz cerca de 93,5% do sal-gema, mas este valor pode variar entre 92,6% a 95% dependendo do local. O restante é constituído por outros sais e alguns materiais argilosos e siliciosos. A única exceção são alguns filões de sal branco que são compostos por 99,9% de halite pura. A halite cristaliza na forma cúbica ou apenas quadrada e o tamanho dos cristais com que se apresenta é muito variado, desde milimétrico até mega cristais com 5 cm, mas empiricamente observou-se que a maioria dos cristais não ultrapassava 1 cm de tamanho.

A sua coloração depende da quantidade de impurezas presentes e podem ser de minerais de ferro, silvite (KCl), carnalite (KCl e $MgCl_2$ hidratados), anidrite ($CaSO_4$), gesso ($CaSO_4$ hidratado) e argila. A presença ou a ausência destes minerais conferem à halite uma vasta gama de cores e tonalidades: transparente, branco, laranja, vermelho, rosa, cinzento e castanho. As cores mais escuras, como o castanho, devem-se a uma maior percentagem de componentes detríticos como argilas. Por vezes a halite apresenta-se muito deformada e é comum verem-se camadas finas de argilito interestratificadas com as de halite. No tratamento do sal as impurezas são designadas por contaminantes e os quatro principais presentes neste diapiro são os cloretos de cálcio e potássio, gesso e argila.

Quando o sal-gema de cor escura corta o sal-gema de tons mais claros forma zonas de cisalhamento. Pensa-se que tenha ocorrido nestas zonas dissolução do sal

induzida por movimentos tectónicos e consequentemente isso originou uma concentração de minerais insolúveis como argilas e cinzas vulcânicas. Também se observa uma variedade de sal castanho que se encontra em carreamentos saídos para fora das sequências. Em alguns casos a cor castanha deve-se aos detritos vulcânicos.

A figura seguinte mostra a diversidade de cores que o sal-gema do diapiro de Loulé apresenta, desde os mais claros aos mais escuros. Os aspetos mais escuros contêm inclusões minerais de gesso e argilito.



Figura 13 – Cristais de sal-gema do diapiro de Loulé mostrando a variedade de cores com que se pode apresentar em função do tipo de impurezas presentes. Da esquerda para a direita observa-se uma gradação na tonalidade das cores, começando por transparentes e brancos e passando pelos rosa e laranja até chegar aos castanhos mais escuros. Também se pode observar inclusões minerais de gesso, siltito e argilito. (Crédito: Fotografia do autor)

O sal-gema em geral apresenta-se com um aspeto elegante de bandado composicional sedimentar (*bedding*) (Fig. 15a), em massas de halite interestratificada com outros elementos ou em massas amorfas causadas pela deformação. Uma hipótese para a formação de uma bacia de evaporitos que também explica a formação do bandado composicional no sal-gema é proposta por **Jeremic (1994)** na sua teoria

de “*bar-basin*”. De acordo com esta hipótese, a concentração de soluções ricas em sal é favorecida por ambientes de bacia marginal isolada com entrada periódica de águas marinhas e com um clima quente que provoca a evaporação da água. Conforme a quantidade de sais e a densidade da água aumenta, a existência da fauna e da flora dentro da bacia torna-se inviável. Quando as condições necessárias são atingidas dá-se primeiro a deposição de carbonatos de cálcio e óxidos de ferro e depois segue-se a deposição de gesso e halite. Nesta fase a vegetação ao redor da bacia morre e é transportada para o seu interior explicando os níveis de iodo nos depósitos de sal. Novas incursões de águas salgadas ajudam na deposição de mais camadas de halite seguidas pela deposição de gesso e anidrite. O assoreamento da bacia ao longo do tempo favorece a deposição de sais de potássio e magnésio. A erosão dos terrenos ao redor da bacia produz sedimentos que são transportados e que se depositam no interior da bacia como argilas, siltes e areias. Estas ajudam na proteção dos evaporitos da dissolução por agentes climáticos. Os movimentos tectónicos e a subsidência da bacia podem reativar o processo e levar a uma nova deposição de evaporitos. Este processo cíclico é provavelmente o responsável pela formação do bandado observado no sal-gema. Este aspeto de estratificação bem definida ocorre por toda a mina e permite observar bem como as características da deformação tardia. A O Mar Morto é um exemplo atual do que se pode ter passado há 230 milhões de anos e que levou à formação dos enormes depósitos de sal encontrados na Bacia Algarvia e ao longo do Mediterrâneo.

Uma variedade diferente de sal-gema que ocorre no diapiro são zonas de sal-gema puro de cor branca constituído por 99,5% de halite. A sua génese pensa-se estar associada com as intrusões magmáticas que ocorreram no diapiro e que provocaram remobilização por pressão e recristalização do sal nos planos de falha e zonas de cisalhamento por onde o material ígneo ascendeu (**Lopes et al., 1998**). A halite recristalizada tem coloração branca muito pura e uma granulometria grosseira que ronda os 5 cm (Fig. 14). Alguns destes filões de sal branco visíveis ao nível da mina possuem enormes proporções. Um dos maiores é mostrado no mapa da mina na Figura 25 e também aos 835 m na Figura 22 onde dobras em bainha com o bandado original podem ainda ser observadas na zona recristalizada. Infusões de gás CO₂ preenchem as fraturas e a porosidade intragranular destas zonas. Apesar de a sua origem não ser bem conhecida acredita-se estar também relacionada com a injeção de diques do Cretácico, descritos adiante. Não há certeza na causa de formação pois ao nível da mina a localização de alguns filões de sal-gema branco situam-se ao lado de diques de lamprófiros enquanto outros filões encontram-se isolados no interior de

camadas de sal-gema bandado. Na mina, os trabalhadores chamam “sal pipoca” a este tipo de sal-gema porque quando se pisam os fragmentos deste sal que se encontram caídos no chão, eles estalam como pipocas (Figura 14c). As zonas de sal-gema branco representam as zonas de trabalho mais perigosas na mina de Loulé devido às bolsas de gás CO₂ que ocorrem no seu interior. Estas bolsas apresentam uma forma elipsoidal e podem atingir enormes proporções. Durante o desmonte e com o alívio da pressão litoestática, as bolsas podem rebentar e o gás é libertado numa explosão violenta deixando buracos de *blow-out* no lugar onde o gás se encontrava aprisionado. Um caso destes ocorreu na mina quando uma bolsa de gás com 30 m de comprimento (Fig. 14a) rebentou durante o desmonte e atirou com a roçadora pelo ar. Para evitar estes acontecimentos procedem-se a estudos geológicos e de alívio de pressão.



Figura 14 –Zonas de sal-gema branco; **a)** Halite branca com granulometria grosseira numa zona de cisalhamento rica em gás CO₂ com um buraco elíptico de *blow-out* no teto da galeria da mina; **b)** Filão de halite branca apresentando dobras em bainha no meio de dois diques de rocha ultrabásica; **c)** Detalhe do chão e da parede de uma zona onde ocorreu *blow-outs*, mostrando um fraturamento generalizado na halite branca de granulometria grosseira com fragmentos angulares de “sal pipoca” no chão da galeria. A localização das fotos está marcada no mapa da mina na Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

4.2 Rochas Argilosas e Siliciosas

Este tipo de mineralizações encontram-se no seio do sal-gema nas mais diversas formas e são na sua maioria argilitos e siltitos e dependendo da sua natureza também podem ser xistos argilosos. Estas inclusões no sal-gema podem ser encontradas com alguma variação na sua dureza e nem sempre com uma aparência totalmente litificada. Na maioria dos casos, à vista desarmada estas mineralizações têm uma aparência semelhante e nem sempre se conseguem distinguir, por isso em geral será usado o termo argilito para se referir às mineralizações deste conjunto exceto em alguns casos em que é feita a sua distinção.

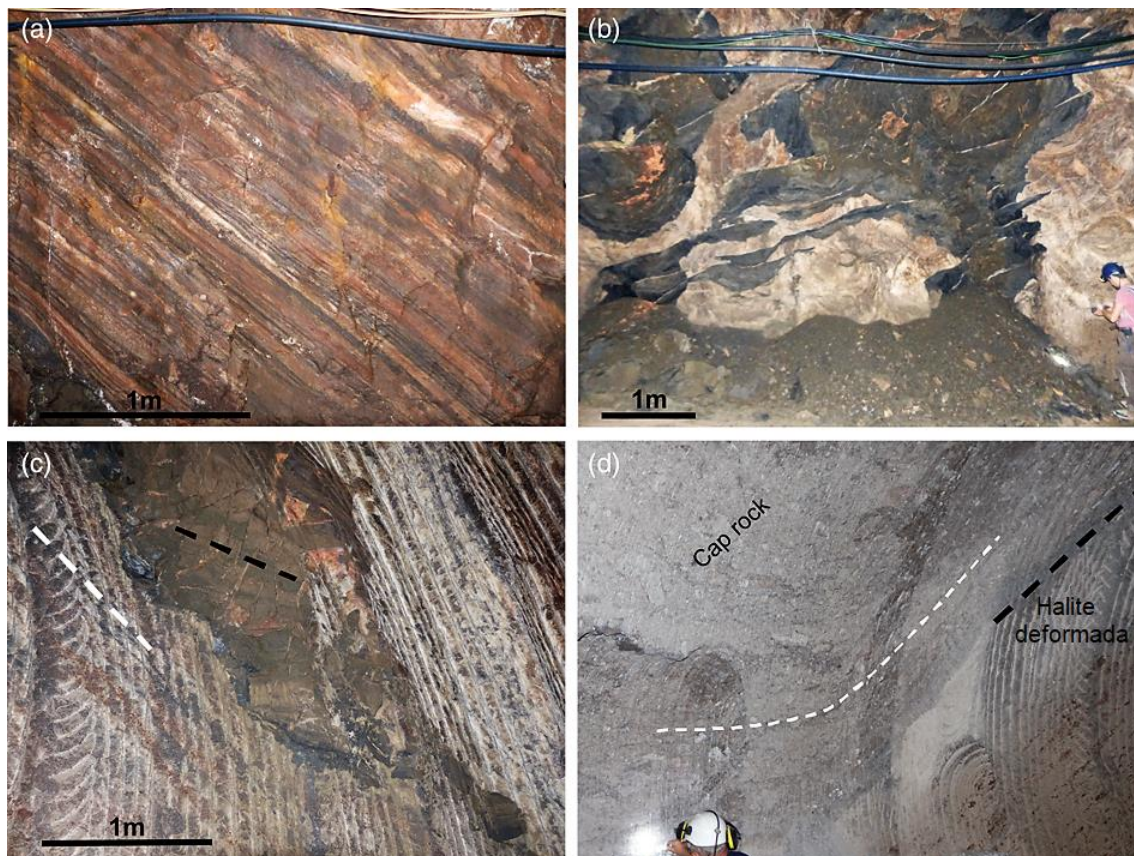


Figura 15 – Mineralizações encontradas no sal-gema; **a)** Sal-gema exibindo o bandado composicional sedimentar, formado por halite interestratificada com argilitos e gesso. As cores da halite variam com a quantidade de impurezas que contém; **b)** Camada espessa de siltito afetada por veios preenchidos com halite; **c)** Camada espessa de siltito com uma estrutura em *boudinage* e estratificação irregular (linha tracejada a preto) em posição oblíqua ao *fabric* principal da halite (marcada com a linha tracejada branca); **d)** *Cap rock* de gesso brechificado no contacto norte do diapiro. A linha tracejada a branco indica a orientação alongada do *fabric* de clastos na brecha do *cap rock*. A linha a preto indica o *fabric* planar a que os clastos são deformados no contacto com o diapiro. A localização das fotos está marcada na Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

Camadas de argilito com colorações avermelhada e cinzento-escuro encontram-se interestratificados com as várias tonalidades do sal-gema. Possuem uma espessura que varia entre 0,5 e 5 *cm* e um espaçamento entre os estratos de 0,05 a 1 *m*. Segundo dados não publicados de **Davinson et al (2016)** alguns níveis do argilito mais escuro são ricos em matéria orgânica, atingindo um conteúdo em carbono orgânico total de 6,9%.

As camadas de argilito apresentam-se muitas vezes descontínuas devido à deformação tardia e tal fator age como uma boa forma de observar a deformação que ocorreu internamente ao longo do diapiro. Devido a possuírem um comportamento diferente do sal-gema quando expostos à deformação causada por movimentos ou forças de compressão, os argilitos são responsáveis pelas estruturas de deformação mais notáveis no interior da mina, as quais são descritas mais à frente. Encontram-se também na mina várias camadas proeminentes de argilito cinzento-escuro e avermelhado e de siltito com espessuras até 2 *m*. A sua localização está marcada no mapa da Figura 25 e podem observar-se também na Figura 22 entre os 50 e os 100 *m*. Por se encontrarem neles a presença de polens das espécies *Tiradispora* e *Praecirculina*, estes depósitos clásticos foram datados como do Triássico Superior ao Hetangiano (**Doubinger et al., 1970**).

Em muito menor quantidade, raro até, também se encontram presentes algumas camadas de *cherts* com coloração cinzenta-escura. Em geral a espessura destas camadas é cerca de 10 *cm* e é possível observar uma destas camadas na Figura 21.

4.3 Diques de Lamprófiros Ultrabásicos

Várias intrusões de diques de lamprófiros ultrabásicos penetraram no interior do diapiro no final do Cretácico. Estas injeções no diapiro estão associadas com a ocorrência de um evento ígneo generalizado que produziu também os maciços de Monchique e Sintra. Este evento magmático ocorreu no mesmo período em que a colisão Alpina teve início e portanto existe a probabilidade de os dois estarem relacionados. Usando a técnica de datação K/Ar em biotite a idade destas intrusões foi determinada como tendo $71,8 \pm 1,9$ Ma, a qual está em par com a idade determinada para as intrusões alcalinas de Monchique e Sintra (**Miranda et al., 2009; Machek et al., 2014**).

No estudo realizado por **Machek et al. (2014)** sobre a interação do sal com os diques chegou-se à conclusão que a zona de reação era limitada a cerca de 1 m

para cada lado do dique. A maioria dos diques apresenta-se disposta em ângulos baixos ou subparalela à estratificação mas alguns deles encontram-se dispostos com ângulos muito oblíquos em relação à estratificação e em alguns pontos cortam através de dobras (por ex. a 830 *m* na Figura 22). A grande variação que se observa no ângulo entre os diques e a estratificação deve-se às injeções terem ocorrido numa sequência dobrada de sal-gema mas em geral essa variação diminuiu devido ao cisalhamento Alpino. A maior espessura registada num dique dentro da mina tem 3,5 *m* e encontra-se representado na Figura 22 aos 645 *m*.

Dos três tipos de litologias encontrados na mina, os diques de lamprófiros são as rochas mais competentes. Os lamprófiros são rochas incomuns com uma composição ultrabásica altamente potássica e são geralmente frações tardias do *melt* com um teor caracteristicamente elevado em voláteis como H₂O e CO₂ (Rock, 1991). Pressões elevadas nos fluidos teriam sido produzidas pelas altas temperaturas do magma ultrabásico causando expansão térmica e desidratação nos argilitos e metamorfização nos evaporitos. No tempo durante e posterior das injeções de diques houve a ocorrência de fraturamento hidráulico com desenvolvimento de texturas em *jigsaw* (Fig. 16a e b). Como já foi referido, o magmatismo dos lamprófiros pode ter sido o responsável pela fonte de gás CO₂ encontrado nas zonas de cisalhamento do sal-gema branco.

Pouco tempo depois da injeção, ou talvez até durante, os diques de rocha ultrabásica foram fraturados em várias direções produzindo enormes estruturas com uma combinação de formas *jigsaw* e *boudinage*, da qual é exemplo a imagem da Figura 16a. Observa-se que durante o processo de fraturamento a halite fluiu para os espaços abertos entre os fragmentos dos diques e em menor quantidade também se observa halite fibrosa a preencher alguns veios. Isto é indicativo que eventos de fraturação-selagem (*crack-seal*) ocorreram e que se deveram provavelmente a flutuações na pressão dos fluidos. Aberturas vazias ainda se encontram preservadas no interior de fraturas indicando que as pressões dos fluidos estavam em equilíbrio litoestático quando a formação dos veios ocorreu e essas pressões mantiveram-se até recentemente quando a mina foi aberta (Fig. 16b).

Na parte norte do diapiro de Loulé, os diques do fim do Cretácico atuam como bons marcadores de tensão para a deformação Alpina tardia e ajudam a identificar os aspetos de deformação que foram causados somente pela compressão Alpina tardia. A compressão Alpina produziu *boudinage* nos diques do Cretácico Superior e esse

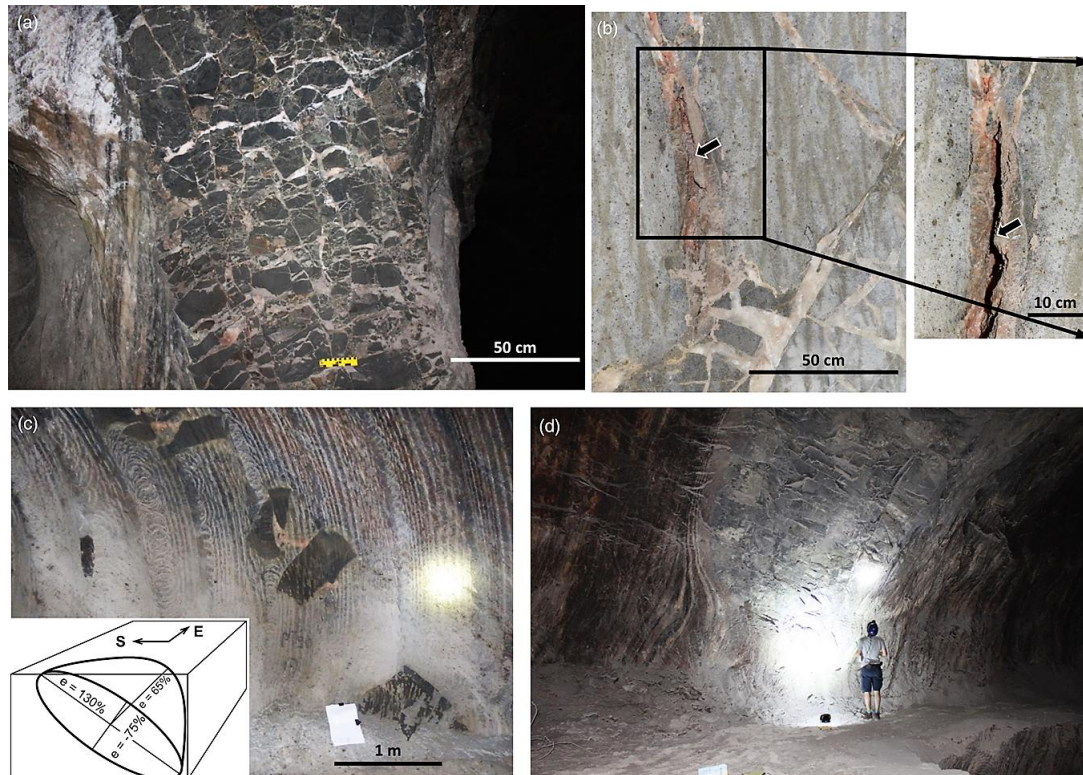


Figura 16 – Diques de lamprófiros ultrabásicos; **a)** Dique de um lamprófiro ultrabásico com textura de brecha em *jigsaw* e veios preenchidos com halite; **b)** Detalhes do preenchimento de halite em veios mostrando halite fibrosa, com a seta a indicar uma abertura vazia natural no interior do veio; **c)** Dique esticado com a medida do comprimento de linha ao longo dos boudins a indicar uma extensão de 130%. O esquema inserido indica um valores de deformação linear nas três principais direções do elipsoide deformado; **d)** Estrutura de *pinch and swell* num dique de grande envergadura. A localização das fotografias na mina está marcada na Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

aspeto é bastante visível em *boudins* angulares que se encontram largamente separados (Fig. 16c). Medições do comprimento de linha nos diques mais finos (<0,5 m) que sofreram boudinage mostram que os valores máximos para a extensão linear atingem os 130% nas paredes verticais das galerias norte-sul e 65% no teto das galerias horizontais de direção este-oeste, como representado no esquema da Figura 16c. Assumindo um volume de deformação constante e que a direção de encurtamento máximo no diapiro é aproximadamente perpendicular à deposição do sal, isto implica que um encurtamento máximo de 75%, ou seja, o diapiro encurtou para 25% do seu tamanho original como exemplificado também no elipsoide da Figura 16c (Davison *et al.*, 2016). Os diques maiores são os menos deformados e apresentam uma estrutura suave de *pinch and swell* ou então estão separados em *barrel-shaped boudins*, isto é mostrado na Figura 16d e aos 640 m na Figura 22. Devido a isso, estes não podem ser usados para medir a deformação total Alpina. Em geral, quanto mais espessos são os diques mais intensamente fraturados se

encontram e consequentemente mais pequenos veios em *jigsaw* apresentam (Fig. 16a). Em algumas zonas, o sal-gema interestratificado com outros sedimentos mostra dobras e cavalgamentos inclinados para sul, cortados depois pelos diques de rocha ultrabásica.

4.4 Estruturas de Deformação

Estudos realizados no diapiro, ao longo das galerias da mina, revelaram três fases independentes de deformação. A primeira fase de deformação ocorreu provavelmente no Jurássico Médio durante o regime de distensão. O aparecimento de blocos crustais separados por falhas provocou um movimento descendente do sal-gema numa superfície inclinada e originou o aparecimento de dobras deitadas e cavalgamentos sub-horizontais tendendo para sul. A segunda fase ocorreu no Cretácico Superior e possivelmente também no Paleogeno. Desta vez a deformação foi provocada pela ascensão vertical do sal-gema e criou uma sequência de dobras em bainha sinformes na massa de sal que se encontram separadas por cisalhamentos com materiais detríticos. A terceira fase de deformação ocorreu durante o Neogeno e é marcada pelo aparecimento de cavalgamentos dúcteis e frágeis no seio do diapiro. Uma descrição mais detalhada das três fases de deformação encontra-se em **Terrinha et al. (1990)**.

As principais estruturas internas de deformação que ocorrem no diapiro de Loulé são dobras recumbentes (sub-horizontais), zonas de cavalgamento, dobras em bainha sinformes com planos axiais muito inclinados e zonas de cisalhamentos no sal-gema. Entre elas, as estruturas que causam mais impacto são a versatilidade na aparência das zonas de cisalhamento que serão descritas de seguida com maior pormenor. Em **Davison et al. (2016)** é-lhes atribuída a designação de “*streaky shear vein zones*” que traduzido é algo como zonas de veios de cisalhamento às riscas mas para simplificar serão designadas aqui apenas por zonas e estruturas de cisalhamento. Elas consistem em veios de halite recristalizada de cor branca ou avermelhada por partículas de ferro, com um núcleo central contendo cristais de granulometria grosseira (1 a 3 cm). Na área circundante destas zonas de cisalhamentos criam-se redes de veios que se infiltram nas camadas de sal-gema e argilito em ângulos elevados (Fig. 17d). Em ambos os lados do veio central aparecem camadas de argilito castanho-avermelhado intercalado com halite recristalizada, formando zonas com uma espessura de 3 a 5 cm (Fig. 17d).

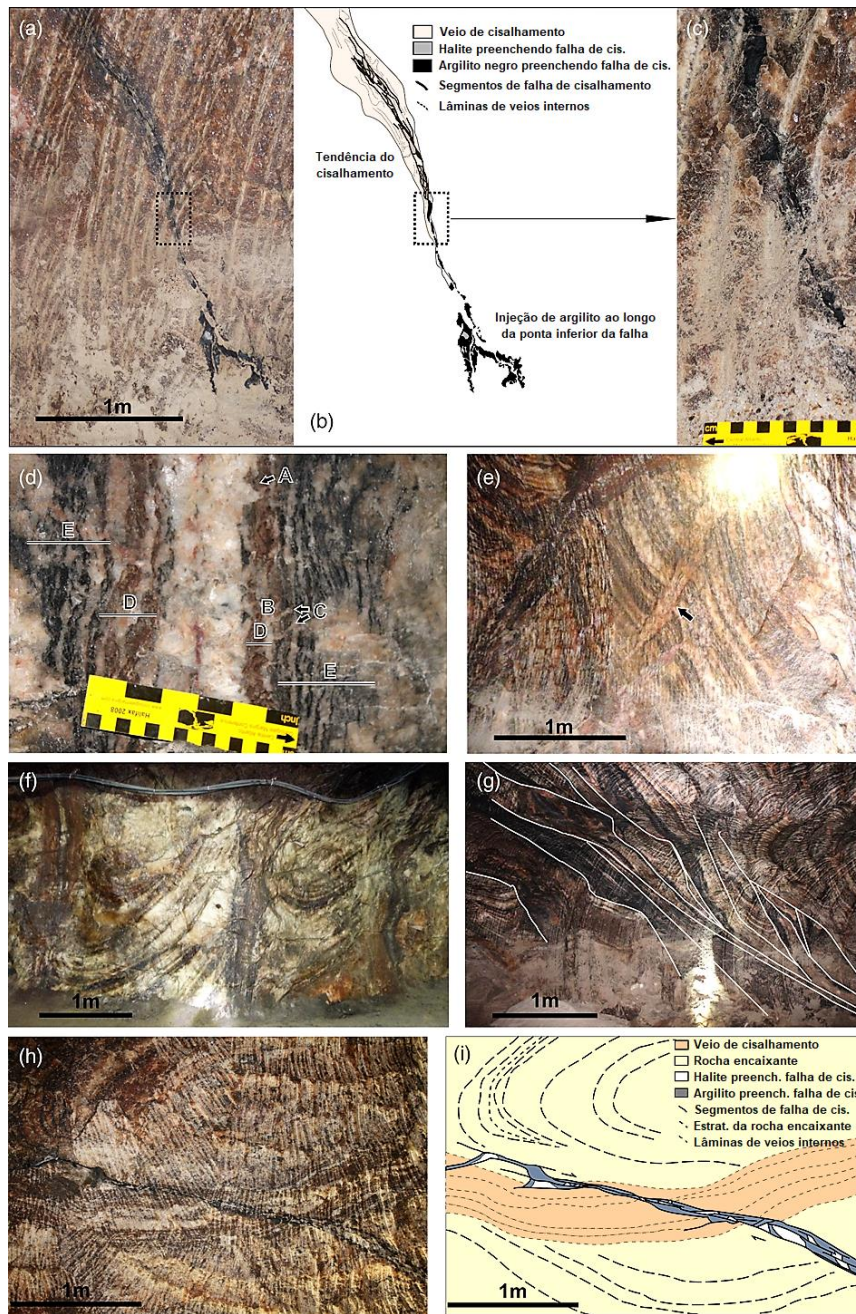


Figura 17 – Zonas e estruturas de cisalhamento; **a)** e **b)** Fotografia e correspondente desenho de uma zona de cisalhamento com uma injeção irregular de veios de argilito na ponta inferior; **c)** Detalhe de uma zona de fraturamento tardio cortando através da zona de cisalhamento com injeções de argilito escuro ao longo do plano de falha; **d)** Detalhe de uma zona de cisalhamento mostrando um veio de halite central e lâminas de argilito cinzento e avermelhado intercalados com a halite recristalizada. A - protusão de cristãos irregulares crescendo a partir do veio central; B - veio atravessado num ângulo ligeiramente oblíqua com dois veios ramificados (C) que cortam através das camadas finas em ângulos muito inclinados; D - zona interior de riscas de argilito avermelhado e halite recristalizada; E - zona exterior de riscas de argilito negro e halite recristalizada; **e)** Veio espesso de halite, indicado pela seta, mostrando um ligeiro deslocamento das camadas que atravessa; **f)** Detalhe de zonas de cisalhamento cortando através de dobras em bainha siniformes; **g)** Falhas de carregamento imbricadas de comportamento frágil-dúctil, demarcadas pelas linhas brancas; **h)** e **i)** Fotografia e correspondente desenho mostrando detalhes de uma falha de cisalhamento tardia cortando através da zona de cisalhamento. Preenchimento de argilito negro ao longo dos planos de falha com halite a preencher aberturas de pull-apart ao longo do plano irregular da falha. A localização das fotografias está marcada na Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

Mais afastado e também aparecendo em ambos os lados do veio central, aparece uma zona de riscas de um argilito mais escuro, exibindo sempre uma orientação paralela em relação às outras camadas. Estas estruturas têm uma largura entre 5 a 10 *cm* para cada lado do veio central (D na Fig. 17d). Estas zonas de cisalhamento cortam abruptamente através das camadas dobradas de halite e argilito e não apresentam deflexão das camadas nas zonas de contacto, como por exemplo na Figura 17f. Também não há evidências de um aumento progressivo do cisalhamento nos veios destas zonas. Em geral, estas estruturas de cisalhamento têm cerca de 20 a 30 *cm* de largura e dispõem-se ao longo do sal-gema com um espaçamento de 3 a 5 *m* entre cada estrutura. A zona da mina onde se vêem com maior frequência está entre os 600 e os 700 *m* da Figura 22, mas note-se que nos primeiros 200 *m* da zona norte do diapiro estes cisalhamentos não estão presentes. Isto pode sugerir que a deformação Alpina ou o fluxo de fluidos foi menos intensa nessa parte do diapiro.

Uma variante deste conjunto são as estruturas de cisalhamento planares isoladas ou em leque. Como o nome indica são estruturas de cisalhamento que aparecem isoladas e com características planares e subparalelas. Outra característica que as distingue é a difusão das suas terminações superiores e o seu fim abrupto. Exemplos desta variante ocorrem entre os 1025 e 1075 *m* na Figura 22 e podem ser vistos na Figura 18. A largura máxima deste tipo de estrutura é atingido na parte de cima que chega a medir 50 *cm*, depois vai estreitando até à parte de baixo até uma largura de 1 a 2 *cm*. O aspeto laminado às riscas não pode ser causado por cisalhamento simples devido a nas partes superiores haver um bom desenvolvimento do *fabric* às riscas do argilito e da halite onde este desenvolvimento deveria ser mínimo. Em certas partes da mina é possível observar algumas destas estruturas no seu todo onde atingem um comprimento de 10 *m* desde a parte superior à inferior (Fig. 18). Por vezes estas estruturas são afetadas por cisalhamentos tardios que causam a formação de veios de carnalite e falhas preenchidas com argilito escuro localizadas no interior ou próximo das estruturas de cisalhamento (Fig. 18b e 17h). Falhas de cisalhamento tardio por vezes cortam através das estruturas de cisalhamento de forma irregular e terminam próximo da parte de baixo das estruturas. Injeções de argilito podem ocorrer nestas falhas e produzir veios injetados de lama na parte inferior destas estruturas, como ocorreu na zona de cisalhamento da Figura 17a e b. Aquando da injeção, é provável que o argilito fosse uma lama de baixa viscosidade pois se fosse litificado não penetraria tao facilmente por entre aberturas tão pequenas.

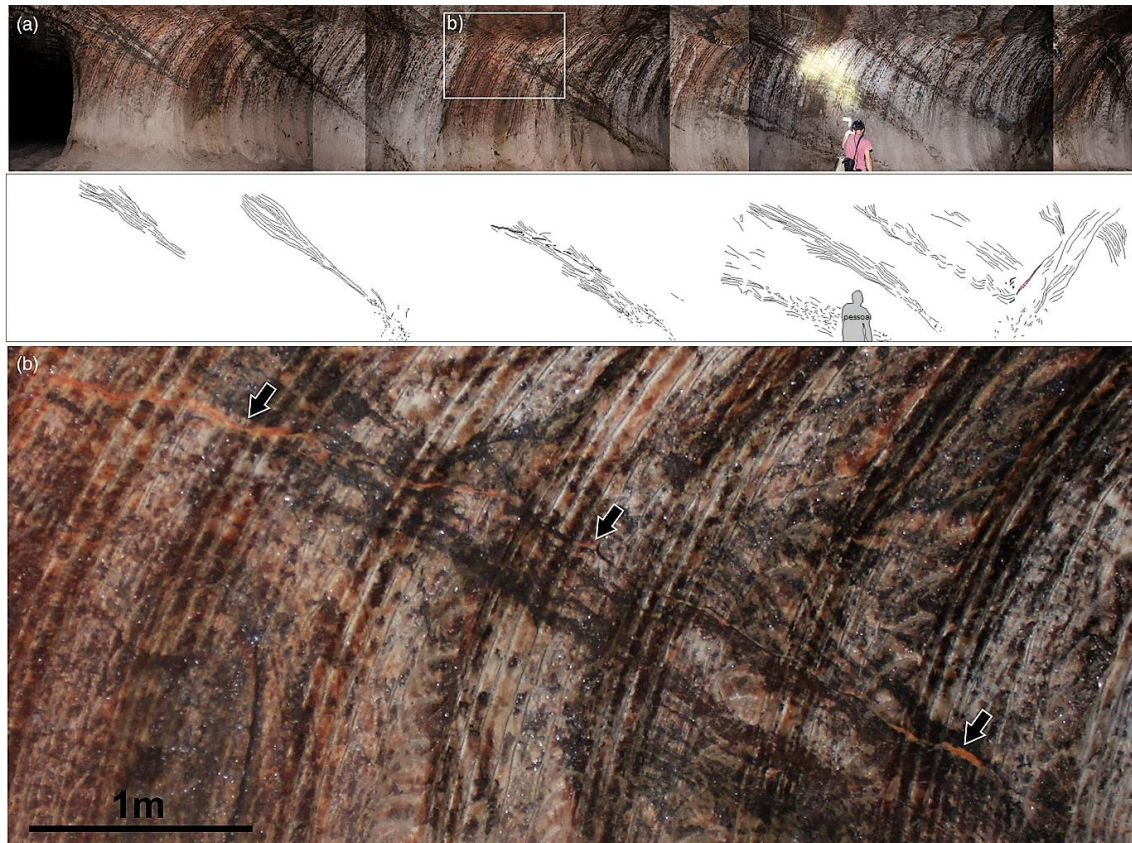


Figura 18 – Estruturas de cisalhamento planares isoladas; **a)** Vista panorâmica e respetivo desenho de zonas de cisalhamento planares isoladas com inclinação típica para norte de idade Alpina; **b)** Visão aproximada da ponta superior da estrutura em leque com preenchimento posterior de veios oblíquos por carnalite, assinalados com setas. A localização das fotografias está marcada no mapa da mina da Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

Entre os três tipos de diferentes zonas e estruturas de cisalhamento, as mais espetaculares são as zonas de cisalhamento de estruturas poligonais que ocorrem na parte central e sul do diapiro. Estas novas estruturas têm uma forma poligonal 3D achatada losângica e mais ou menos hexagonal. Estas zonas poligonais possuem o mesmo *fabric* interno da variante em leque mas com uma largura relativamente constante e encontram-se dispostas lado a lado como os alvéolos num favo de mel. Originalmente a sua forma deveria ter sido mais regular e hexagonal, hoje em dia apresentam alguma deformação provocada pela compressão Alpina tardia que os achatou e tornou mais alongados. O eixo longo na superfície plana destas estruturas varia entre 1 e 5 m de comprimento e o eixo curto entre 1 a 2 m (Fig. 19). A dimensão total das zonas que apresentam estas estruturas de cisalhamento não é exatamente conhecida mas pelo menos dois níveis de polígonos são observados na mina, empilhados um em cima do outro (Fig. 19a). Nas junções onde três lados de polígonos diferentes se juntam, os veios de cisalhamento não mostram qualquer deslocamento

significativo e leva a crer que o movimento lateral foi mínimo e que as zonas intercetantes desenvolveram-se em sincronia (Fig. 19c). Não se sabe ao certo a origem desta geometria poligonal mas sabe-se que não são características herdadas porque se desenvolveram depois dos dobramentos em bainha e atravessam centenas de camadas de halite. Pensa-se que a sua formação esteja associada a pressões verticais sobre o sal-gema. Como a argila possui maior mobilidade que o sal, as tensões que atuavam sobre elas poderão ter-se dissipado em todas as direções resultando nas estruturas em hexágonos, onde a argila se encontra nos bordos.

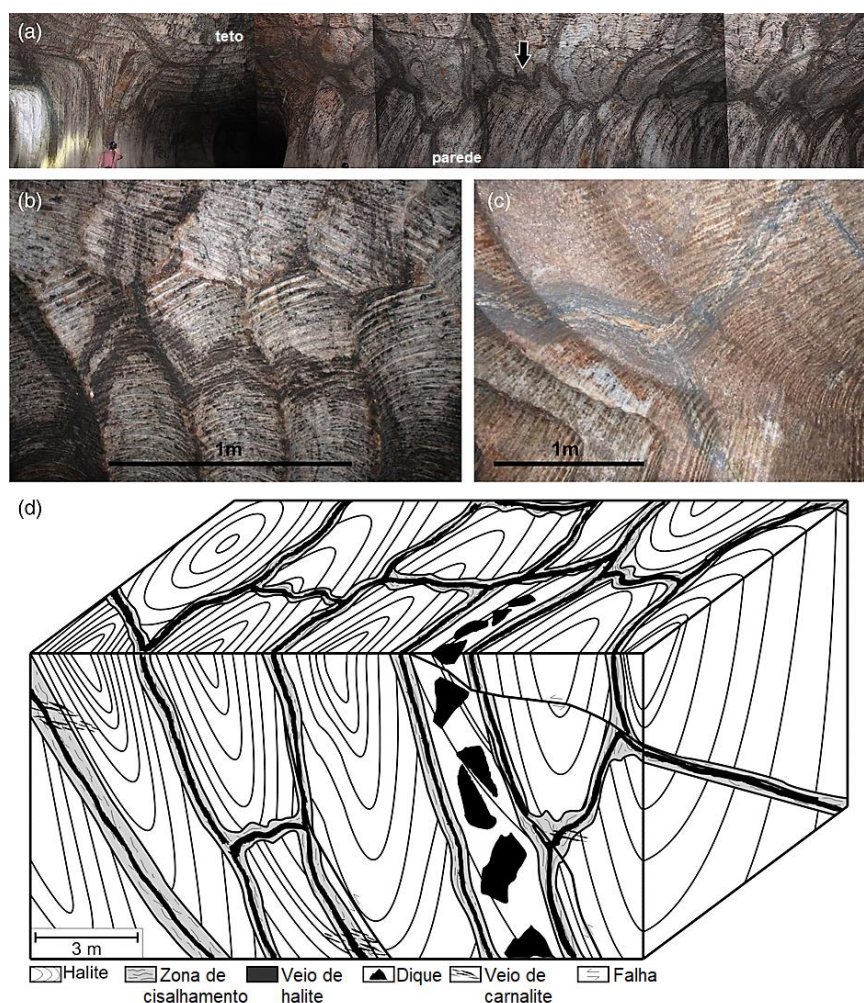


Figura 19 – Zonas de cisalhamento de estruturas poligonais; **a)** Vista panorâmica de uma zona de cisalhamento de estruturas poligonais com geometria dobrada nos lados curtos do polígono, assinalada pela seta, indicando que os polígonos originais sofreram compressão; **b)** Vista das estruturas poligonais no teto da galeria da mina; **c)** Detalhe de uma junção tripla entre as estruturas poligonais no teto da galeria mostrando que não há deslocamento na junção, sugerindo uma formação simultânea. **d)** Diagrama em bloco esquematizando a geometria planar das zonas de cisalhamento de estruturas poligonais com dobras em bainha sinformes intervindo na estratificação da halite e falhas de cisalhamento tardias. A localização das fotografias está marcada no mapa da mina da Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

Das outras estruturas de deformação observadas no diapiro, temos os cavalgamentos e as falhas de cisalhamento. Através do diapiro é possível encontrar cerca de dez grandes cavalgamentos com comportamento frágil-dúctil ou apenas frágil. Na maioria dos casos estão associados com a formação tardia de veios de carnalite como o exemplo da Figura 17f. Em menor frequência também se encontram falhas normais com brechas de halite e argilito a preencher o plano de falha como mostrado na Figura 20. Pensa-se que estas falhas ocorreram relativamente tarde na história da deformação pois ainda apresentam geometrias bem preservadas e que não foram afetadas pelo fluxo diapírico tardio. Os cavalgamentos e as falhas normais bem preservadas sugerem que a deformação aconteceu em taxas de deformação rápida e com pressão de fluidos elevada (Davinson, 2009).

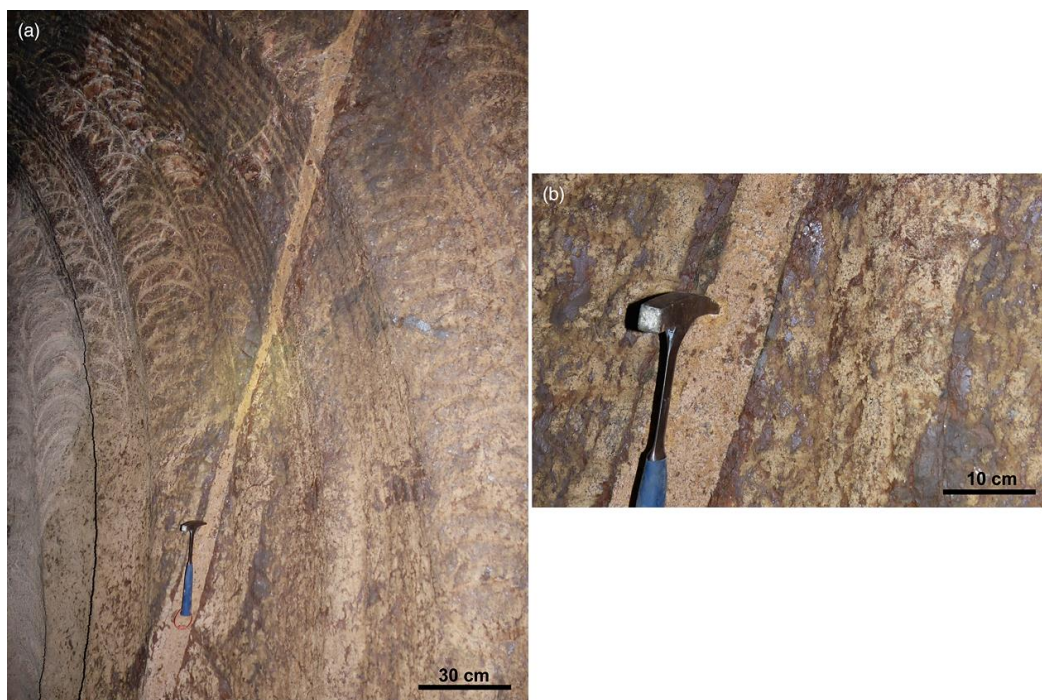


Figura 20 – **a)** Zona com uma falha de cisalhamento tardia observada na parede da galeria; **b)** Detalhe do preenchimento da brecha de sal e argilito na caixa de falha. A localização das fotografias está marcada na Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

A figura seguinte mostra algumas estruturas causadas por dobramentos. Os dobramentos ocorrem em duas escalas: pequenas dobras vistas à escala, como as da Figura 21, e grandes dobras detetadas apenas por mapeamento. A deformação por dobramentos é visível de forma generalizada em grande parte da mina. A maioria dos dobramentos que se observam resultaram do processo de ascensão do diapiro e/ou

da compressão Alpina. Já foi possível observar alguns aspetos de dobramento no sal-gema em figuras anteriores, como as dobras em bainha sinformes no filão de halite branca na Figura 14b ou no sal-gema da Figura 17f.

Terrinha (1989) sugere que a camada de *chert* dobrada da Figura 21b constitui uma dobra recumbente, redobrada por deformação diapírica. Esta camada possui uma espessura de 5 cm e está rodeada por uma camada de sal-gema de grande envergadura. O contraste na competência dos dois materiais é bastante visível, a camada de sal mostra-se pouco perturbada pelos dobramentos em comparação com a complexidade exibida nos dobramentos na camada de *chert*.

Uma descrição mais detalhada sobre as estruturas de deformação do diapiro de Loulé e as relações existentes entre elas pode ser consultada no estudo efetuado por **Terrinha (1989)**. Em **Davison et al. (2016)** é possível ler mais sobre as zonas e estruturas de cisalhamento e também sobre o seu mecanismo de formação.



Figura 21 – Estruturas de deformação causadas por dobramentos; **a)** Traços de estratificação elíptica na parede vertical da galeria causados por eixos muito inclinados de dobras em bainha; **b)** Dobras apertadas numa camada fina de *chert* na parede da galeria; **c)** Fechamento em elipse da mesma camada de *chert* vista no teto da galeria, indicando que as dobras possuem uma curvatura de eixos muito inclinada. A localização das fotografias está marcada no mapa da mina da Figura 25. (Fonte: Davison et al., 2016)

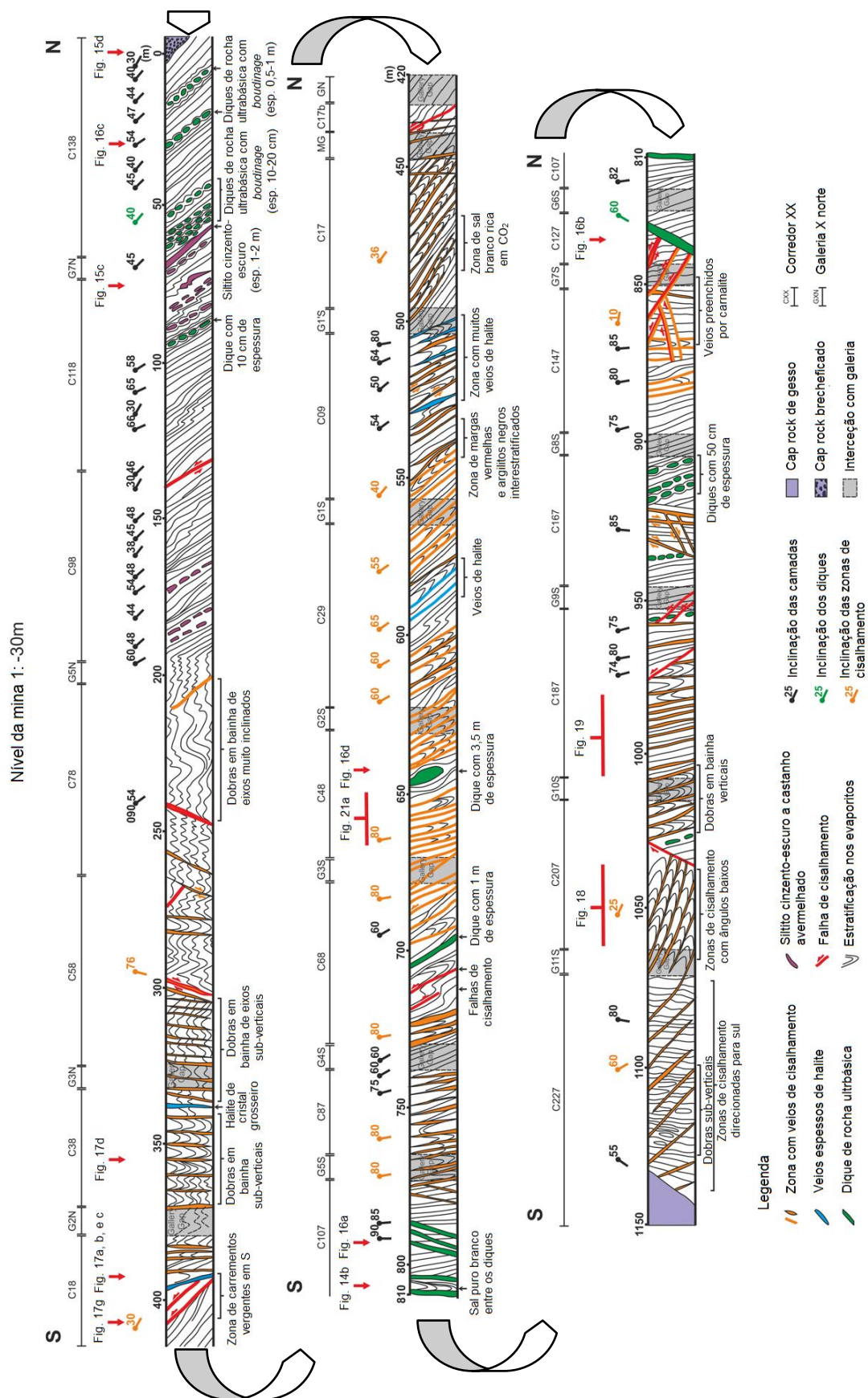


Figura 22 – Secção norte-sul através da mina, a 230 metros abaixo da superfície. Medições em metros desde 0 a 1150 estão marcadas por cima da secção. A localização da secção está marcada no mapa da mina na Figura 25. (Fonte: Davison *et al.*, 2016)

A Figura 22 mostra os vários aspetos e estruturas observados ao longo do conjunto de câmaras centrais (câmaras 7 e 8) da rede de galerias da mina. Fazendo o percurso através delas é possível vislumbrar os efeitos das várias fases de deformação. As diferentes fases de deformação afetaram a estratificação original e alteraram a ordem natural com que o sal-gema se encontrava disposto. Devido a isso é possível criar alguns zonamentos ao longo da secção com base na forma geral como o sal-gema se apresenta. Assim temos: desde 0 a cerca de 190 *m* a primeira zona caracterizada por salgema com estratificação muito inclinada; desde 190 a cerca de 380 *m* uma segunda zona caracterizada por grandes dobramentos e dobras em bainha; desde 380 a cerca de 500 *m* uma terceira zona de carreamentos, camadas inclinada e filões de sal-gema branco; desde 500 a cerca de 1030 *m* uma quarta zona de grande comprimento muito diversa nas características que apresenta mas em geral as camadas e a estratificação apresentam-se muito inclinadas e mesmo sub-verticais; dos 1030 aos 1150 *m* a quinta e última zona mais intensamente marcada por zonas de cisalhamento. Portanto, é possível distinguir pelo menos cinco zonamentos diferentes no sal-gema ao longo da mina. De uma forma geral a parte norte do diapiro está mais associada aos movimentos dinâmicos e por isso apresenta uma maior quantidade de *boudinage*, a zona sul por sua vez apresenta uma maior resistência associada. Já a zona central é a charneira dos movimentos e por isso apresenta-se mais intensamente dobrada.

5. A Mina Campina de Cima

Os primeiros indícios da existência de sal em Loulé deram-se em 1944 após um ano de seca, quando num poço de água doce se apresentaram águas salgadas com grande deposição de sal nas suas paredes. A aspiração de águas profundas, foi assim, o primeiro indicador de que sal em profundidade existia na região. Foi apenas no final de 1960, com a realização de furos de sondagem para a pesquisa de águas subterrâneas, que se pôde comprovar que sob Loulé haviam realmente enormes quantidades de sal. O aparecimento da mina veio a concretizar-se em 1964 sob a gerência da CLONA, uma sociedade criada para a exploração do sal desta região.

Com a descoberta do diapiro salífero em Loulé, apareceu o interesse de explorar o sal como minério económico. Desde 1964 que a Mina Campina de Cima opera com este desígnio. Na atualidade a mina é dirigida pela CUF Químicos Industriais S.A. que está encarregue da sua exploração.

A designação oficial da mina é “Campina de Cima C-17” e situa-se na freguesia de S. Clemente, concelho de Loulé, distrito de Faro. Em Portugal há quatro concessões de minas de sal, sendo esta a única com fluxo ativo. Os primeiros trabalhos na mina começaram pela abertura de dois poços verticais, existentes atualmente, até aos 260 m de profundidade e em seguida pela escavação da galeria principal (Fig. 24b) que faz a ligação entre eles, a uma profundidade de 230 m, com 280 m de comprimento. A galeria principal e algumas câmaras adjacentes, são considerados zona permanente de rolagem e são os únicos locais na mina com iluminação permanente durante o horário de expediente, no resto da mina a iluminação vem da lanterna dos capacetes e/ou dos veículos. As Figuras 23 a e b mostram as estruturas construídas na superfície acima de cada um dos poços, designadas de cavaletes, e as Figuras 24a, b, c e d mostram uma pequena visão de alguns pormenores que se encontram perto da entrada do primeiro piso da mina.

O poço 1, P1, é o poço principal e é nele que se faz o transporte das pessoas entre a superfície e o primeiro nível da mina. Está equipado com um guincho e duas jaulas que no conjunto são o equipamento de elevação (Fig. 23a e 24a). Cada jaula tem uma capacidade de transporte máxima de sete pessoas e desloca-se com uma velocidade de 1 m/s, fazendo a viagem até ao primeiro nível da mina durar 230 s, ou seja, quase 4 min. Apesar da primeira metade das paredes do poço estarem quase todas revestidas por betão no início e depois por “tijolo-de-burro”, a partir daí é possível contemplar o sal-gema. É também através deste poço que é feito o

fornecimento da energia elétrica e também do ar, com a ajuda de um ventilador que proporciona um caudal até 6000 m³/min. Todo o equipamento que vai para a mina, incluindo veículos, é desmontado se necessário e desce igualmente pelo poço principal.

O poço 2, P2, por sua vez está equipado com um guincho e dois *Skips* que são usados para o transporte do sal-gema até à superfície, tendo cada um a capacidade de 4,6 toneladas e uma velocidade de circulação de 2,4 m/s. Além da extração do minério, este poço destina-se também à saída do ar viciado. Junto a ele está colocado um ventilador aspirante que aspira o ar do interior da mina e o leva até ao exterior sendo filtrado de forma a lhe serem retiradas as poeiras de sal-gema antes de ser libertado para o ambiente. Além da existência dos ventiladores, o poço 1 tem cota da boca mais baixa que o poço 2, originando uma diferença de pressão que ajuda na circulação natural da corrente de ar. Ao nível do solo, centrada no poço 2, eleva-se uma torre pintada de verde com 38 m de altura (Fig. 23b), o equivalente a um edifício de cerca de 12 andares, fazendo dele o edifício mais alto da cidade de Loulé.



Figura 23 – a) Cavalete de suporte ao elevador de transporte do poço 1. b) Cavalete/torre do poço 2 por onde é feita a extração do sal-gema. (Créditos: a) Centro de Ciência Viva do Algarve; b) CUF)

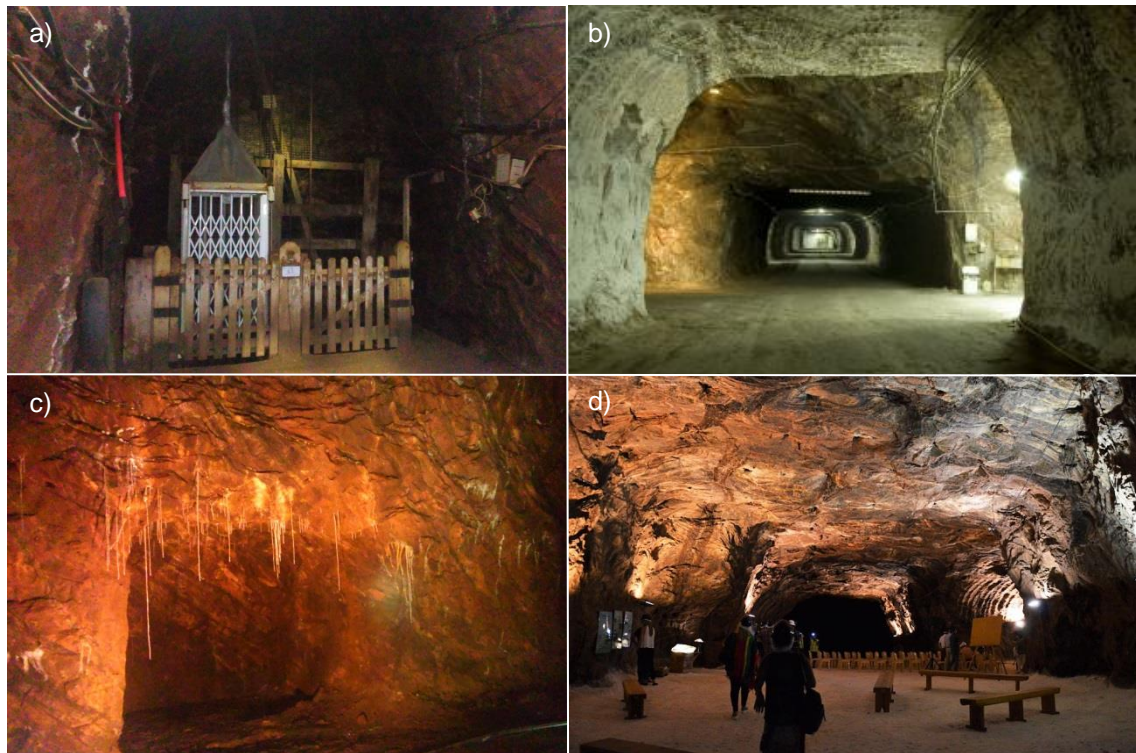


Figura 24 – a) Jaula no fundo do poço 1; b) Visão em profundidade da galeria principal; c) Estalactites formadas pela dissolução do sal devido à humidade que entra com o ar ventilado; d) Espaço de eventos. (Créditos: a) e c) Fotografias do autor; b) CUF-QI; d) Sul Informação)

Para entrar na mina é necessário vestir equipamento adequado. O equipamento de utilização obrigatória e que deve permanecer sempre equipado durante a estadia na mina são as botas de trabalho com biqueira e palmilha reforçadas, um capacete, uma lanterna e um cinto para prender a bateria da lanterna e que pode ser usado também para prender outros utensílios como um martelo. O vestuário também deve incluir um colete refletor para visitantes ou um fato próprio com elementos refletores para os trabalhadores da mina.

O método de exploração utilizado é o de câmaras e pilares com um alinhamento das câmaras segundo a direção N-S e galerias que as intersectam de forma perpendicular segundo a direção E-W, criando-se assim uma rede de galerias com a forma de uma malha retangular como mostra o mapa da mina na Figura 25. A distância entre os eixos centrais de cada galeria é 60 m e entre os eixos centrais de cada câmara é 23,5 m. A secção vertical tanto das câmaras como das galerias tem, presentemente, 4,5 m de altura e 10 m de largura, fazendo com que cada pilar, com forma retangular, meça 50 m no lado mais longo e 13,5 m no lado mais curto. Posteriormente e sem qualquer risco, o plano de lavra da mina contempla a hipótese de rebaixar o chão da mina para ficar com 9 m de altura ou de pé-direito, sendo que algumas câmaras existentes já apresentam esta dimensão.



Figura 25 – Mapa da rede de galerias do piso 1 da mina e das estruturas geológicas já mapeadas. A seção alvo deste estudo, sombreada a cinzento, mede cerca de 1,15 km. A localização das estruturas representadas é retirada de Terrinha (1989). Muitos dos diques e as zonas de cisalhamento ainda não foram mapeadas. A localização de algumas das outras figuras foi marcada no mapa. Também está assinalado o dique estudado por Machek *et al.* (2014). (Fonte: Davinson *et al.*, 2016)

Atualmente, a mina é constituída por dois pisos, estando cada um a uma distância vertical, entre soleiras de galeria, de 34 m abaixo do anterior e o acesso aos níveis mais profundos é feito através de rampas que descem desde o piso 1. Presentemente a traçagem da mina já permite o acesso até um quarto piso ainda que os trabalhos de exploração só tenham sido desenvolvidos no primeiro e segundo pisos. O primeiro piso é o mais vasto, estendendo-se na direção N-S por 1,15 km desde o *cap rock* a norte até ao *cap rock* a sul. Apesar da dimensão que contém, a exploração de minério, presentemente, só é realizada no piso 1, não havendo necessidade de explorar os níveis inferiores mas ainda assim contém uma área de exploração potencial de 1200 hectares. Todas juntas, as câmaras e as galerias já perfazem uma extensão de tuneis com mais de 40 km.

Os pilares dos níveis inferiores foram projetados de forma a sobreponem-se verticalmente com os do nível acima deles, desta forma garante-se a estabilidade estrutural da mina, pois devido ao comportamento elasto-plástico do sal-gema não é necessário qualquer tipo de sustentação adicional. A situação que representa risco maior, na mina, são os *blowouts* de gás fóssil que ocorrem na zona do sal-gema branco com grau de pureza de cerca de 99,5% em NaCl. Ainda na área da segurança em comparação com outras minas de exploração de outros minérios não se verifica uma acumulação de gases tóxicos nas zonas mais antigas. O ar nessas zonas continua respirável mesmo após a atividade mineira cessar. Além disso, existe na mina um sistema de portas obturadoras e de controlo que ajudam no fluxo da circulação de ar, auxiliando na distribuição de ar puro pela mina e no encaminhamento de ar viciado para fora dela, pelo poço 2. Em geral a segurança na mina é muito elevada. Os movimentos detetados, resultantes das forças regionais que nela atuam, são controlados à milésima do milímetro e em média os movimentos totais registados são cerca de 8 centésimas de milímetro por ano.

O desmonte no interior da mina era realizado até 1974 por meios tradicionais, recorrendo a martelos pneumáticos ligeiros e explosivos, sendo depois abandonado em favor de um desmonte mecânico usando roçadoras de ataque pontual. A mudança do processo de exploração visou vantagens como uma maior segurança obtida pela ausência de saneamentos constantes, pela ausência de gases poluentes libertados pelas explosões, associados ao fato principal que se traduz numa maior eficiência e eficácia de produção com um reduzido número de pessoas. Tudo isso proporcionou uma maior eficiência na exploração do sal-gema. O sistema de ventilação atual empregue na frente de desmonte está esquematizado na Figura 26.

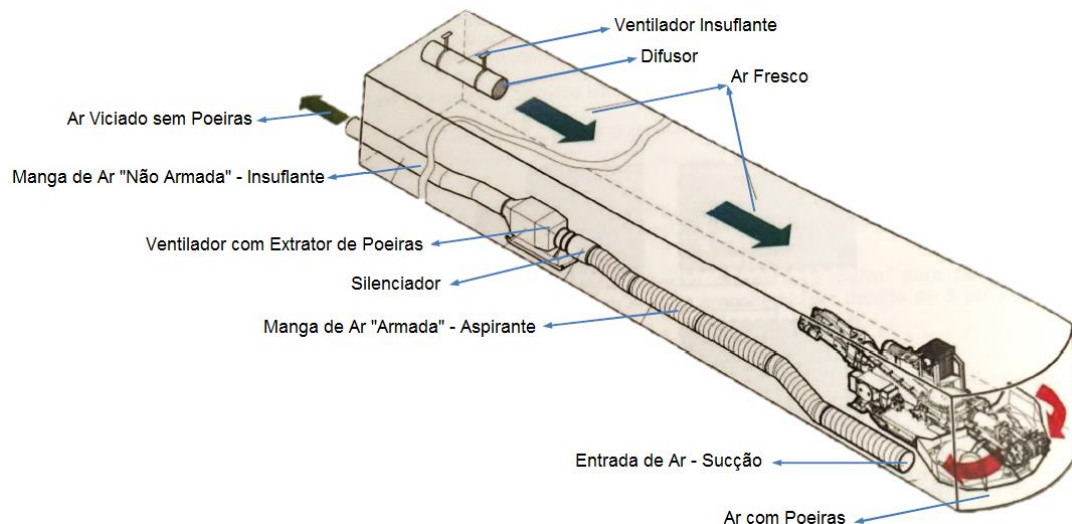


Figura 26 – Esquema dos processos de ventilação em execução na frente de desmonte. (Crédito: CUF-QI)

A mina possui três roçadoras em estado funcional, duas do tipo *Alpine Miner AM 50* (Fig. 27a), e outra do tipo *Atlas – Copco ET – 110 Q*. De momento existe apenas uma frente de desmonte com dimensão de 4,5 m de altura e 10 m de largura, executadas em duas passagens laterais da roçadora, ou seja, desmontando uma frente com 5 m de largura em cada passagem e estando uma delas um pouco mais avançada em relação à outra. As imagens das Figuras 27 mostram alguns elementos do processo de desmonte e da ventilação envolvida.

A roçadora avança 4 m em cada turno de laboração, com uma capacidade de extração de 50 toneladas por hora. Um feixe de raio laser indica o ponto médio da galeria, ao operador, e é utilizado para a orientação das frentes, com base no sistema de topografia definido na mina. Para um funcionamento a cem por cento da exploração de minério no interior da mina bastariam apenas cinco pessoas mais o auxílio da tecnologia. A peculiaridade das minas de sal-gema permite esta alta rentabilidade no seu funcionamento.

O sal-gema desmontado é recolhido na parte da frente da roçadora e é encaminhado para a parte de trás por um transportador de racletes e por um transportador direcional que o deixa cair na traseira de um camião de modelo pouco convencional de marca IPV (Fig. 27d), que possui uma capacidade de carga de toneladas. O camião transporta o minério até à zona de tratamento onde depois de depositado passa por um processo de *scalping* para retirar o material inferior a 12 mm de granulometria. O sal-gema é movimentado por correias transportadoras, passa por crivos que o separam por granulometria e por um moinho de martelos onde é moído até atingir a granulometria correta. No fim é encaminhado para os *Skips* que o transportam até à superfície onde é embalado e expedido.



Figura 27 – Elementos do processo de desmonte e da ventilação envolvida; **a)** Roçadoras *Alpine Miner AM 50* utilizadas no desmonte do sal-gema; **b)** Manga responsável pela sucção do ar com poeiras na frente de desmonte; **c)** Roçadora em execução na frente de desmonte; **d)** Camião recebendo a carga de desmonte antes de o transportar até à zona de tratamento de minério (Créditos: CUF - QI)

Em alternativa o sal-gema também é armazenado no interior da mina, depois de ter sido processado, em lotes de granulometria diferente. Estes lotes destinam-se a ser usados na agricultura, nas rações de animais e na segurança rodoviária, nomeadamente na dissolução de gelo nas estradas. Na ração animal ele é usado na alimentação de animais de grande porte pela vantagem de conter adicionalmente argilas, outros minerais e ferro, ao contrário do sal marinho. O sal-gema extraído também pode ser usado no tratamento de águas de carácter duro e na indústria química para desenvolver produtos químicos de base recorrendo a eletrólise sobre uma salmoura saturada, tais como ácido clorídrico, cloro líquido, hipoclorito de sódio, soda cáustica líquida e sólida e hidrogénio. Desta forma o sal-gema tem o potencial de se relacionar com várias indústrias como a têxtil, a química, a da celulose, a do alumínio, a dos detergentes e sabões, a do tratamento de águas e metais e a alimentar, onde os produtos químicos produzidos podem ser utilizados em diversas cadeias de processo. Ainda assim, existe na mina algum material estéril que provém

dos diques de rocha básica e argilas mas como este material não é extraído para a superfície, não altera nem promove qualquer impacto ambiental.

Fora do contexto de exploração mineiro, a Mina Campina de Cima é por vezes alvo de eventos como as exposições de instalações de arte contemporânea, a Geologia no Verão, um evento organizado todos os anos pelo Centro de Ciência Viva, ou como palco de eventos musicais como o Festival de Jazz de Loulé, devido às camaras de sal-gema apresentarem uma acústica perfeita para concertos de música.

6. Trabalho Prático e Laboratorial

O trabalho prático e laboratorial realizado durante o estágio na Mina Campina de Cima pretendia caracterizar mecanicamente o sal-gema do diapiro de Loulé recorrendo a alguns métodos geofísicos. Para isso foi necessário realizar uma recolha e preparação das amostras de sal-gema antes de se realizarem os ensaios em laboratório. São descritas de seguida as três etapas que envolveram o trabalho prático deste estudo.

6.1 Recolha das Amostras de Sal-gema

A recolha das amostras de sal-gema foi realizada na Mina Campina de Cima, em Loulé. A amostragem deu-se em duas fases separadas que inicialmente se pretendia que se diferenciasssem pelo método de recolha usado e pela forma das amostras recolhidas, mas tal acabou não ocorrer como desejado. Na primeira fase recolheram-se blocos de sal-gema soltos, encontrados caídos no chão da mina, ao longo de um conjunto de câmaras 7 e 8 de orientação N-S identificadas no mapa. Estes blocos com formas angulosas tinham dimensões diferentes e um peso que variava entre 5 a 16,5 kg. Nesta fase foram recolhidos 10 blocos de sal-gema num total de 85 kg de peso. Dois exemplos dos blocos recolhidos são mostrados na Figura 28.

Na segunda fase pretendia-se recolher as amostras das paredes da mina utilizando uma serra de corte. O objetivo era obter amostras orientadas e comparar os dados obtidos nesta fase com os da primeira fase, para identificar através da orientação a influencia que esta tinha nos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais. Pretendia-se verificar também de que forma a descompressão dos blocos soltos se iria diferenciar nos resultados em comparação com as amostras recolhidas das paredes. Infelizmente tal não foi possível de concretizar devido a razões técnicas. A tentativa de recolha de amostras com uma serra de corte foi feita mas verificou-se que seria difícil obter amostras com as dimensões desejadas e no tempo disponível. Assim, os planos tiveram de ser reajustados e decidiu-se por fazer uma nova recolha de blocos soltos ao longo do conjunto de câmaras 7 e 8. Esta segunda recolha de amostras foi mais seletiva que a primeira, de forma a representar melhor o sal-gema das câmaras a que pertenciam. Isso resultou num maior número de amostras recolhidas mas de menor

dimensão. Nesta fase recolheram-se 22 amostras de sal-gema com um peso que variava entre 2 a 10 kg, num total de 118 kg em peso.

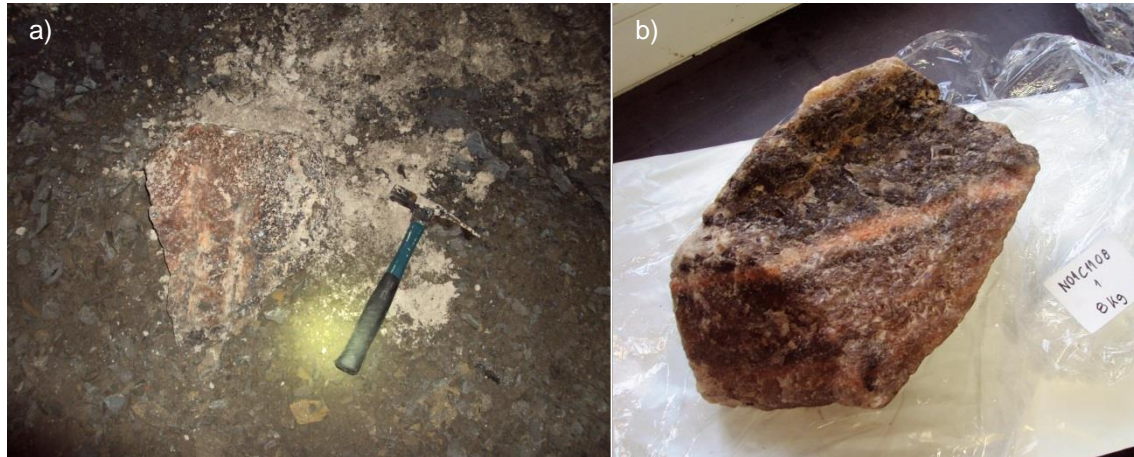


Figura 28 – Exemplos de amostras de sal-gema recolhidas; **a)** Bloco de sal-gema encontrado no chão da mina durante a recolha de amostras da primeira fase; **b)** Bloco de sal-gema desembalado no laboratório para ser serrado; (Créditos: Fotografias do autor)

Devido ao estado em que se encontravam os blocos e por razões explicadas acima, nenhuma das amostras de sal-gema, quer da primeira fase quer da segunda, possuem orientação identificada em relação à orientação da mina. Por isso, a orientação das amostras não poderá ser levada em consideração nos resultados obtidos.

Como o sal é conhecido pela sua capacidade em absorver a humidade da atmosfera em redor, tiveram de ser tomadas precauções para diminuir o seu contacto com o ar. Os níveis de humidade podem influenciar os resultados dos ensaios laboratoriais, por isso e de forma a preservar as condições das amostras, estas foram embrulhadas em película transparente, depois metidas dentro de sacos de plástico grosso e por fim colocadas em caixas de cartão para serem transportadas até à FCUP. A Figura 29 mostra as amostras durante o processo de embalagem.

Durante todo o processo de recolha e embalagem, as amostras foram identificadas com numeração e o seu local de recolha registado no mapa da rede de galerias da mina. Esse registo foi transformado na Figura 30 que mostra apenas o recorte do conjunto das câmaras estudado, tirado do mapa da mina (Fig. 25), com a marcação dos locais de recolha das diferentes amostras da primeira fase e da segunda fase.



Figura 29 – Sequência de fotografias mostrando o processo de embalagem das amostras de sal-gema no interior da mina, durante a segunda fase de recolha. No fim seguiam para a FCUP dentro das caixas de cartão. (Créditos: Fotografias do autor).

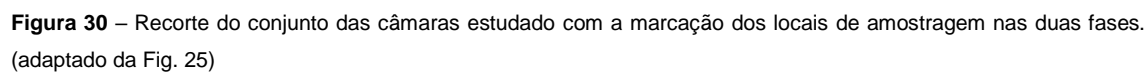


Figura 30 – Recorte do conjunto das câmaras estudado com a marcação dos locais de amostragem nas duas fases.
(adaptado da Fig. 25)

6.2 Serragem e Preparação dos Provetes de Ensaio

Depois de chegarem à FCUP, as amostras foram encaminhadas para uma sala com condições ambiente (temperatura e humidade) controladas. A preservação das condições iniciais de humidade é um fator importante no estudo do sal-gema, por isso a embalagem só foi retirado de cada amostra na altura que esta ia ser serrada. No processo de serragem utilizou-se uma serra circular de 17,5 cm de diâmetro e com bordo diamantado. A serra está montada numa mesa de corte com um tabuleiro deslizante onde se colocam as amostras para serrar. É importante notar que a serragem foi executada a seco, isto é, sem a utilização de água. Ao contrário das rochas siliciosas, o sal-gema é uma rocha de baixa dureza (entre 2 a 2,5 na escala de Mohs) o que a torna relativamente mole e de corte fácil. Durante o corte, o sal absorve todo o calor gerado possibilitando à serra manter-se sempre fria diminuindo assim o seu desgaste.

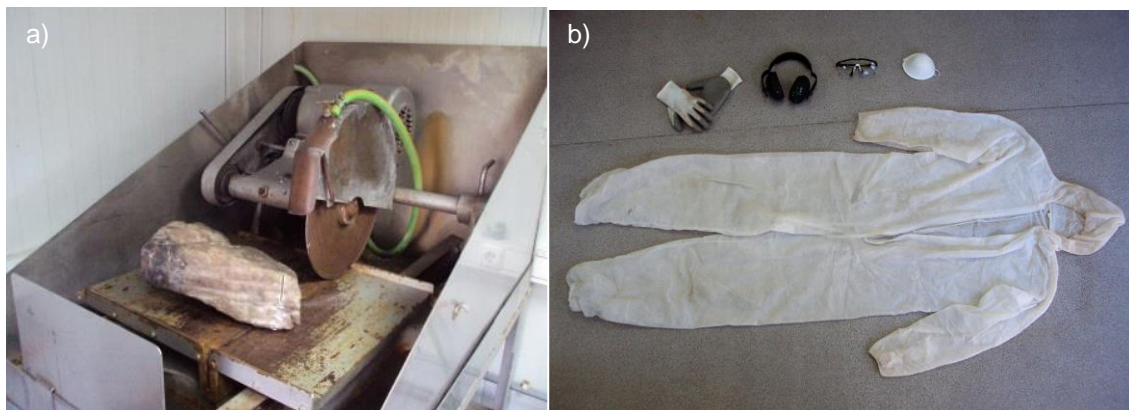


Figura 31 – Equipamento de serragem; **a)** Serra de corte com bloco de sal-gema antes da serragem; **b)** Equipamento de proteção utilizado durante a serragem: luvas, protetores auriculares, óculos transparentes, máscara e fato protetor de corpo inteiro. (Créditos: Fotografias do autor)

Para ajudar a serrar as amostras na forma pretendida utilizou-se uma régua e uma caneta de tinta vermelha para marcar as dimensões e os locais a serrar. As amostras de sal-gema foram assim alinhadas no tabuleiro, que manualmente foi empurrado em direção à serra, e cortadas pelos alinhamentos previamente marcados. A serragem manual não garantiu uma precisão e uma ortogonalidade perfeita no corte das faces, pelo que a diferença entre o local do corte em relação à medida marcada podia variar entre 0 a 2 mm. Como solução utilizou-se um esquadro para verificar a ortogonalidade entre as faces e quando necessário voltava-se a colocar a amostra sob

a ação da serra para desgastar e alisar as faces até a dimensão do provete ser a desejada. A designação de provete refere-se a uma peça pequena de forma bem definida e que é especialmente preparada para ensaios das características mecânicas de um material. A figura seguinte (Fig. 32) mostra um bloco de sal-gema no processo de ser serrado até se obter um provete. A primeira coisa que se fazia era uniformizar a geometria do bloco, como possível, cortando os lados mais angulosos até obter uma forma mais regular. Depois esse bloco maior era cortado em pedaços mais pequenos e com as medidas regularizadas até chegar à dimensão desejada do provete. Depois repetia-se a sequência para os outros pedaços que sobraram, desde que tivessem dimensão suficiente para gerar um provete. Depois de terminar, os provetes eram embalados e etiquetados e repetia-se o processo com um novo bloco.



Figura 32 – Processo de serragem de um bloco de sal-gema em pedaços menores até se obter um provete. (Créditos: Fotografias do autor)

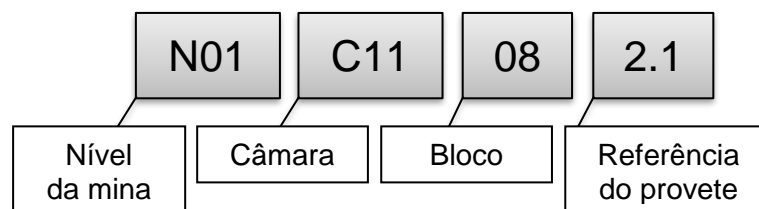
Na primeira fase testaram-se três dimensões diferentes para a forma dos provetes de sal-gema. Os provetes foram serrados na forma de prisma quadrangular com 5 cm de largura na base quadrada. Para a medida da altura foram selecionados

três valores diferentes: 10, 12,5 e 15 *cm*, de modo a estabelecer um rácio base-altura de 2, 2,5 e 3, respetivamente. A dimensão dos provetes é de maior importância para os ensaios de resistência à compressão e a escolha por estes valores está explicada na respetiva secção deste método. Além dos prismas também foram serrados cubos com 5 *cm* de lado com o objetivo de verificar a anisotropia nos ensaios com ultrassons.

Depois de se testarem as três dimensões na primeira série de ensaios laboratoriais, na segunda fase apenas se serraram provetes com 12,5 *cm* de altura e 5 *cm* de largura da base. Excecionalmente também resultaram nesta fase 3 provetes de 10 *cm* de altura, mas tal deveu-se à dimensão da amostra não ter tamanho suficiente para serrar provetes com 12,5 *cm* de altura. Das 22 amostras recolhidas durante esta fase, verificou-se depois que duas delas não tinham dimensão suficiente para gerar um provete completo e por isso as amostras 2 e 17 não constam nos resultados.

Durante o processo de serragem observou-se que o sal-gema com maior percentagem de argilito era mais coeso durante o seu corte, apresentando-se menos quebradiço durante o processo e tornando-o levemente mais fácil de executar. É provável que o conteúdo em argilito confira ao sal-gema um comportamento menos frágil, pelo menos ao ser serrado.

Após serem cortados, cada provete foi depois embalado em película transparente e em seguida ensacado em uma manga plástica. Nos provetes da primeira fase verificou-se que isto não era suficiente para os proteger de acumularem humidade, por isso na segunda fase envolveram-se os provetes com papel absorvente de cozinha antes de os embrulhar com película transparente. Depois, com etiquetas autocolantes, marcou-se cada provete com um código de identificação definido da seguinte forma:



Os algarismos para o nível da mina, câmara e bloco identificam o local da amostragem na rede de galerias da mina e a referência do provete identifica o provete em si. O primeiro algarismo na referência dos provetes é o número correspondente ao bloco de sal-gema recolhido e o algarismo a seguir ao ponto identifica cada provete

resultante do corte desse bloco, pois de cada amostra era muitas vezes possível cortar mais de um provete. No exemplo dado trata-se do provete 2.1 resultante do corte da amostra de sal-gema número 2, recolhida no local N01 C11 08. A Figura 33 exemplifica a embalagem dos provetes durante as duas fases.

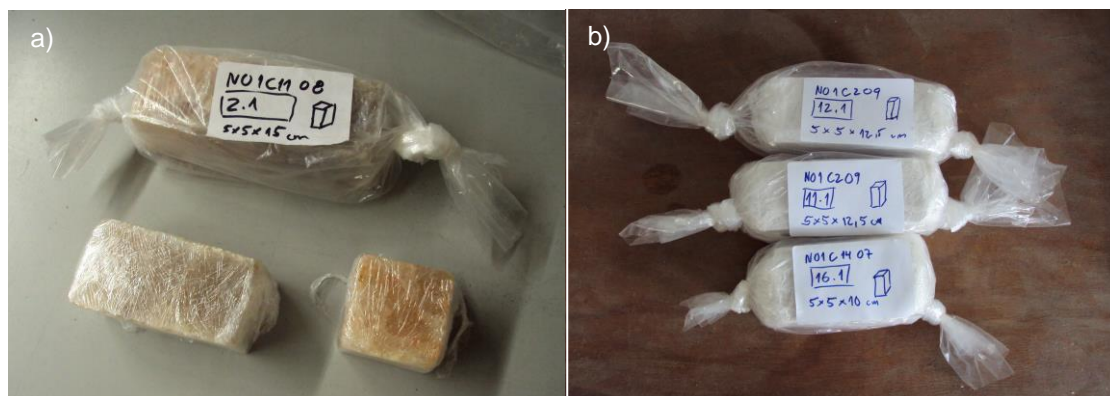


Figura 33 – Provetes embalados e identificados; **a)** Provetes de diferentes tamanhos da primeira fase, um deles está totalmente embalado e identificado; **b)** Provetes embalados da segunda fase, desta vez com papel absorvente.

Da serragem resultaram um total de 30 provetes na primeira série e 32 provetes na segunda, discriminados da seguinte forma:

Tabela 1 – Discriminação dos provetes serrados durante a primeira fase (Série 1) e durante a segunda fase (Série 2), com base na sua dimensão.

Total Série 1	Prismas 10 cm	Prismas 12,5 cm	Prismas 15 cm	Cubos 5 cm
30	4	14	4	7
Total Série 2				
32	3	29	-	-

A figura seguinte, Figura 34, mostra o conjunto inteiro de provetes da segunda fase, colocados lado a lado de modo a ter uma ideia visual da variação da coloração e da composição de cada um, permitindo observar também a estrutura com que o sal-gema se apresenta. Todos os provetes têm 12,5 cm de altura com exceção dos três provetes de 10 cm que aparecem na zona sul.



Figura 34 – Conjunto dos 32 provetes da segunda série dispostos lado a lado, em fila. Apesar de estarem em perspetiva, as referências de identificação de cada provete ainda são visíveis à frente de cada um (com exceção dos cinco primeiros que não têm identificação, eles são 1.1, 1.2, 3.1, 3.2 e 3.3). (Créditos: Fotografias do autor)

6.3 Caracterização Geofísica em Laboratório

Para cada provete de sal-gema serrado fizeram-se uma série de medições prévias. Anotou-se o comprimento de cada aresta do prisma quadrangular, o seu peso e quando existente o ângulo de estratificação visível. Ao mesmo tempo procedeu-se a uma recolha fotográfica das quatro faces retangulares dos provetes identificadas com o respetivo código seguido por uma de quatro letras (A, B, C, D), identificando cada uma das faces. Deste modo é possível identificar a correlação entre a distribuição de conteúdo no sal-gema, como a estratificação, e as fraturas originadas durante os ensaios de compressão. A Figura 35 é um exemplo da recolha fotográfica que se fez para as faces de cada provete.

No provete 11.1 da Figura 35 observam-se algumas inclusões de material negro, provavelmente argilito, e outras de um material avermelhado que possivelmente é carnalite ou silvite. A halite tem uma coloração clara e apresenta uma granulometria grosseira. É possível observar que o material negro encontra-se entre duas camadas de halite com coloração ligeiramente diferente.

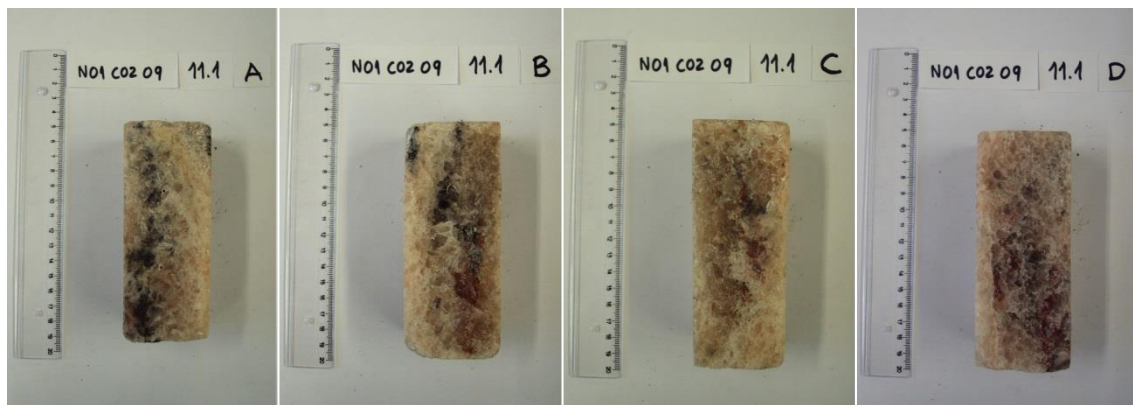


Figura 35 – Fotografias das quatro faces do provete 11.1 da Série 2, identificadas pelas letras A, B, C, D. (Créditos: Fotografias do autor)

Para caracterizar o sal-gema geofisicamente recorreu-se a alguns parâmetros possíveis de serem executados em ambiente laboratorial. Como já mencionado anteriormente, os parâmetros de caracterização escolhidos são a densidade, a velocidade de propagação de ondas ultrassónicas, o módulo de elasticidade dinâmica (módulo de Young), a resistividade elétrica e a resistência à compressão uniaxial. Retirando a densidade e a resistividade elétrica nenhum outro parâmetro foi

previamente testado no sal-gema da Mina Campina de Cima, até onde é possível saber. Como tal, sem estudos locais sobre esses aspetos, executou-se uma pesquisa sobre caracterização mecânica em sal-gema de outros locais do mundo de modo a comparar os resultados e também de forma a ganhar algum conhecimento sobre a metodologia utilizada em estudos já realizados. Para a realização dos ensaios de velocidade de ondas e resistência compressiva uniaxial existem normas estabelecidas pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) e pela *American Society for Testing Materials* (ASTM) as quais foram seguidas conforme foi possível. Devido ao sal-gema ser uma rocha com características únicas, para o teste da resistência à compressão uniaxial foi por vezes necessário fazer algumas adaptações ao procedimento com base na obra *Rock Mechanics in Salt Mining* que apresenta os assuntos com as metodologias adaptadas à caracterização mecânica do sal-gema. Assim como foi dito antes, também este aspeto está desenvolvido na respetiva secção do método.

Cada um dos métodos utilizados no estudo dos diferentes parâmetros de caracterização geofísica encontra-se descrito no capítulo seguinte e a informação está organizada em duas secções separadas. A primeira secção é sobre o fundamento teórico, que como o nome indica, desenvolve um pouco sobre conhecimento em que cada método se fundamenta. A segunda secção é o procedimento laboratorial e descreve o procedimento, assim também como o aparato, utilizado nos ensaios em laboratório. Os resultados obtidos da aplicação de cada método sobre o conjunto de provetes de sal-gema encontram-se apresentados em separado no capítulo a seguir à descrição dos métodos de caracterização geofísica.

O principal objetivo da primeira fase de trabalhos foi o desenvolvimento e aperfeiçoamento dos métodos à análise mecânica do sal-gema. Por vezes durante a primeira fase, os ensaios laboratoriais foram realizados com mais de uma forma diferente, de modo a verificar qual o melhor método a aplicar sob as amostras da segunda fase. Os ensaios da segunda série de trabalhos tornaram-se assim mais adequados e mais rigorosos nos resultados, nos casos em que houve alterações. Ainda assim, a coerência entre os dados das duas séries deve ser verificada.

No fim de se obter os resultados dos cinco parâmetros realizou-se uma análise de componentes principais sobre os dados obtidos. Este tipo de procedimento matemático analisa os resultados de cada parâmetro e mostra se existe algum correlacionamento na sua variância. É uma forma de retirar mais algum conhecimento acerca da relação entre as propriedades geofísicas do sal-gema.

7. Métodos de Caracterização Geofísica

7.1 Densidade

Fundamento Teórico

A densidade ou massa volúmica de um corpo mede o grau de concentração de massa em determinado volume e é definida como o quociente entre a massa e o volume desse corpo, neste caso de um provete de sal-gema. A massa é obtida em g (gramas) e o volume em cm^3 . A densidade costuma ser representada pela letra grega ρ (ró) mas para não se confundir com a resistividade elétrica que utiliza o mesmo símbolo, será usada a letra d que também é geralmente empregue. O seu valor é indicado por conveniência nas unidades do sistema CGS em g/cm^3 , mas a sua conversão para unidades SI é facilmente calculada bastando multiplicar o valor da densidade em g/cm^3 por um fator 10^3 para obtê-la assim em kg/m^3 .

Para o volume foi necessário fazer um arranjo na sua forma de calcular devido à forma dos provetes não ser exatamente regular, de modo a determinar com maior precisão o seu valor. O que se fez foi uma medição da altura dos provetes nas quatro arestas maiores e da sua largura no topo, no meio e na base também nas quatro faces maiores, como indicado na Figura 36.

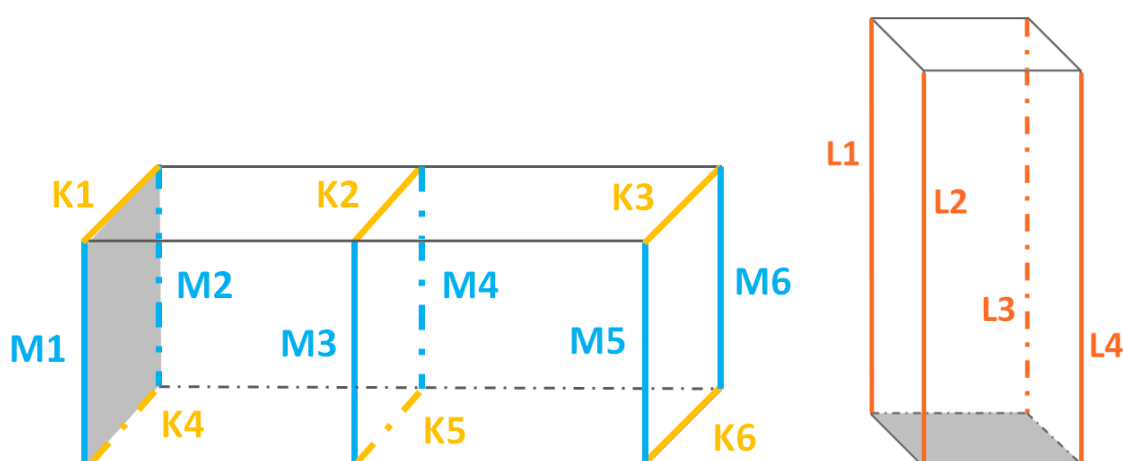


Figura 36 – Esquema de dois prismas quadrangulares com a identificação das várias medições efetuadas para o cálculo do volume. Os valores de M e K representam medições de largura em faces opostas e os valores L representam a altura, ou seja, comprimento das arestas maiores. (Crédito: Criação do autor)

O volume resultou assim da utilização do valor médio dessas medições para o cálculo, segundo as seguintes expressões:

$$V = (\bar{K} \times \bar{M}) \times \bar{L} \quad (1)$$

em que

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^6 \frac{K_i}{6} \quad \bar{M} = \sum_{i=1}^6 \frac{M_i}{6} \quad \bar{L} = \sum_{i=1}^4 \frac{L_i}{4} \quad (2) \quad (3) \quad (4)$$

Onde \bar{K} e \bar{M} são a média da largura de faces opostas e \bar{L} a média da altura de cada provete.

Com o volume determinado e o valor da massa de cada provete obtém-se a sua densidade através da seguinte igualdade:

$$d = \frac{M}{V} \quad (5)$$

Onde:

d , representa a densidade (g/cm^3),

M , a massa do provete (g) e

V o seu volume (cm^3);

Procedimento Laboratorial

O valor da massa foi obtido de forma diferente entre as duas fases. Na primeira fase utilizou-se uma balança analógica porque não havia uma balança digital disponível. Na segunda fase já existia essa disponibilidade e portanto utilizou-se uma balança digital (Fig. 37a) para se pesarem os provetes de sal-gema. O erro de medida com a balança analógica mostrou-se muito superior ao da balança digital, pois o valor mínimo de medição em cada balança era 50 g e 0,1 g, respetivamente.

As várias medidas dos provetes foram obtidas com uma craveira (Fig. 37b) com uma resolução mínima de 0,05 mm. A partir das medições dos lados de cada provete calculou-se o volume aproximado de acordo com as expressões (1), (2), (3) e (4). A densidade foi obtida assim através do quociente entre a massa e o volume como

mostra a expressão (5). Os dados foram colocados em folhas de cálculo *Excel* e os resultados foram gerados automaticamente através das expressões acima referidas. Procedeu-se à elaboração de dois gráficos com a distribuição dos valores da densidade obtidos para todos os provetes, para a série 1 e para a série 2 em separado. Depois calculou-se a média desses valores onde se chegou a um valor médio da densidade em cada série.

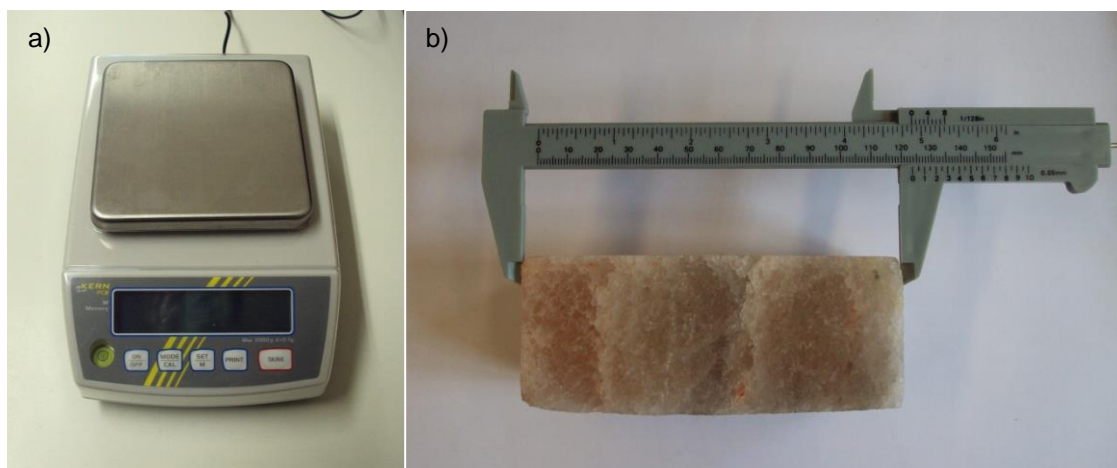


Figura 37 – Equipamento usado para determinar a densidade; **a)** Balança digital utilizada para pesar os provetes da segunda série; **b)** Craveira submilimétrica utilizada para medir o comprimento das arestas nos ensaios para a densidade e utilizada igualmente para medir a distância entre os centros das faces opostas nos ensaios com os ultrassons. (Créditos: Fotografias do autor)

7.2 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassónicas

Fundamento Teórico

Na ciência e na indústria tecnológica é comum usar um grupo de métodos designados como Técnicas Não Destrutivas ou NDT (*Non Destructive Testing*) para examinar um material, componente ou sistema e avaliar as suas propriedades sem o danificar ou causar alterações permanentes. O método de testes ultrassónicos é uma dessas técnicas não destrutivas que faz uso do som como ferramenta de análise. Na aplicação deste método, são transmitidos ao material a avaliar pulsos de ondas ultrassónicas através de um transmissor e recebidos num recetor. O tempo que a onda demorar a atravessar o provete de sal-gema, neste caso, será o dado que servirá para determinar a velocidade de propagação de ondas através do meio e assim caracterizá-lo fisicamente nesse aspeto. Heterogeneidade, imperfeições, espaços ociosos e outras condições no espaço entre o transmissor e o recetor reduzem a quantidade de som transmitido. Para aumentar a eficiência de transmissão usa-se um agente acoplante que reduz as perdas de energia das ondas devido à separação entre o transmissor e a superfície de contacto.

O aparelho usado para medir a velocidade de propagação dos pulsos ultrassónicos é designado por UPV (*Ultrasonic Pulse Velocimeter*) e funciona gerando um pulso ultrassónico que atravessa o provete de sal-gema, registando em seguida o tempo que demorou no percurso. Para isso recorre a dois transdutores, um que funciona como o transmissor do pulso e outro como o recetor e que se encontram ligados ao aparelho. No método utilizado, os dois transdutores são colocados em faces diretamente opostas, produzindo uma transmissão direta dos pulsos. As ondas geradas são longitudinais, com movimento compressional, e simulam a propagação de ondas sísmicas do tipo P.

A velocidade das ondas é depois determinada pela seguinte igualdade:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (6)$$

Onde:

v , é a velocidade das ondas (km/s),

Δx , é o comprimento do provete (mm) e

Δt , é o tempo que a onda levou a percorrer a distância (μs);

O tempo (Δt) que o pulso leva para atravessar o meio é mostrado no painel de controlo do UPV em μs . A distância percorrida (Δx) pela onda entre os dois transdutores é registada em mm . Introduzindo os dados anteriores na expressão (6), a velocidade de propagação (v) da onda é obtida diretamente em km/s e facilmente convertida para as unidades SI em m/s pela equivalência de $1\ km = 1000\ m$.

Descrição do aparato e procedimento laboratorial

O aparelho UPV usado é um modelo 58 E-48 da marca *Controls* (Fig. 38a) e funciona com duas pilhas alcalinas de 1,5 volts do tipo D. Possui dois transdutores que trabalham na frequência de 54 kHz, funcionando um como transmissor e o outro como recetor e que se ligam ao aparelho através de dois cabos coaxiais com ligação BNC. Os valores para o tempo são registados na ordem dos microssegundos (μs) com um valor de medição mínimo de 0,1 μs . Possui também um cilindro calibrador com o valor de 57 μs nele indicado para o tempo que o pulso deve demorar a atravessá-lo e um frasco com um gel de contacto que serve de agente acoplante entre as superfícies de contacto.

Para aumentar a qualidade e a estabilidade do valor obtido para o tempo definiu-se no UPV uma taxa de 5 pulsos por segundo a serem transmitidos. Devido à razão sinal-ruído ser dada pela raiz quadrada do número de pulsos por cada segundo e o aparelho ter um limite de emissão de 10 pulsos/s, só foi possível aumentar para o dobro a qualidade do sinal, definindo-se para 4 (ou superior) a taxa de pulsos/s. Para dobrar novamente a qualidade do sinal seria necessário o UPV conseguir transmitir 16 pulsos/s. Taxas acima dos 5 e até 10 pulsos/s foram experimentadas com os mesmos resultados em qualidade e estabilidade do valor lido, pelo que a sua utilização se tornaria redundante, optando-se por fazer de 5 pulsos/s a taxa padrão dos ensaios efetuados, levando em considerando ao mesmo tempo a otimização da bateria do aparelho.

Em cada ensaio, mediu-se novamente com uma craveira (Fig. 37b) a distância entre os lados opostos nos provetes onde seriam colocados os transdutores. Estas medições de distância serão as utilizadas na fórmula de cálculo da velocidade e são independentes das medições efetuadas para o cálculo do volume. Enquanto as

medições realizadas para o cálculo do volume eram feitas nas arestas, estas novas medições foram feitas entre os centros de cada face onde seriam então colocados os transdutores e nem sempre coincidiam com as medições anteriores.

Colocou-se depois um pouco de gel na superfície condutora de ambos os transdutores. Em seguida empilhou-se com cuidado na vertical o provete de sal-gema entre os dois transdutores e deixou-se o peso deles distribuir o gel pelas superfícies em contacto (Fig. 38b). O valor lido no UPV era registado e o processo era repetido para cada uma das três direções ortogonais atribuídas aleatoriamente a cada provete (X, Y e Z), repondo o gel condutor entre cada medida. Ainda que não se possa relacionar as direções dos provetes com as direções do diapiro, a sua utilização neste ensaio serve para medir a anisotropia no sal-gema.



Figura 38 – Aparato utilizado nos ensaios da velocidade; **a)** 1 - Aparelho UPV; 2 - Transdutores; 3 - Calibrador de medição; 4 - Gel condutor; **b)** Ensaio UPV em execução com o provete de sal-gema colocado entre os transdutores. (Créditos: Fotografias do autor)

Mais no início e depois ocasionalmente, as leituras foram realizadas mais de uma vez para cada face e por vezes com um reajustamento dos transdutores entre as leituras com o objetivo de conseguir um melhor acoplamento. O que se verificou foi que as primeiras leituras tinham, na maior parte das vezes, o valor do tempo mais baixo. Ao se reajustar os transdutores, o valor lido no UPV na maioria das vezes aumentava, provavelmente devido ao espalhamento do gel que consequentemente tornava a camada deste mais fina. Se houvesse nova colocação de gel o valor do tempo diminuía para os valores iniciais. Desta forma o valor de tempo que se considerou para o cálculo foi sempre o valor estável mais baixo. O valor é considerado estável se a sua leitura no UPV não variar ou se variar apenas em alguns algarismos na casa das décimas do microssegundo. Para prevenir valores enviesados pelo uso prolongado do aparelho, a sua calibração era verificada ocasionalmente utilizando o calibrador disponibilizado. Outro aspeto em que se teve atenção, e ainda que se tenha verificado depois que não exercia influência nos valores lidos, foi durante os ensaios com o aparelho houve o cuidado de manter os cabos coaxiais afastados e de não os cruzar para evitar uma possível fonte de ruído de origem eletromagnética no sinal.

Durante a primeira fase foi realizado um ensaio com o UPV na mina, em sal-gema de paredes verticais próximas do poço 1. O sal-gema desta zona apresentava estratificação com direção vertical e possivelmente perpendicular ou apenas inclinada em relação ao plano da parede. Devido a só se poder medir no plano da parede, utilizou-se o arranjo de colocação dos transdutores de transmissão indireta. Este arranjo por ser menos sensível, em comparação com o de transmissão direta utilizado nos ensaios laboratoriais, requeria uma abordagem diferente tanto no procedimento como no tratamento de dados. Devido à falta de experiência e a não ter sido feita uma preparação apropriada, o ensaio não foi realizado nas condições adequadas para produzir resultados válidos e por isso estes não serão incluídos no capítulo dos resultados.

Os valores médios da velocidade de propagação das ondas foram colocados num gráfico linear para cada uma das duas séries de resultados de forma a observar a sua variação ao longo da mina.

Os cubos cortados durante a primeira fase, só foram utilizados nestes ensaios para observação da anisotropia na propagação das ondas, não constando por isso dos ensaios dos outros parâmetros geofísicos. Com os resultados das velocidades ortogonais medidas em cada cubo, construiu-se um gráfico de dispersão de forma a observar a anisotropia da velocidade através da proximidade dos valores das três componentes da velocidade: V_x , V_y e V_z .

7.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Fundamento Teórico

A forma como a tensão e a deformação se relacionam num material sobre carga é descrito qualitativamente por comportamento constitutivo. A forma mais comum deste tipo de comportamento é a elasticidade, a qual pode ser medida e quantificada.

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young como também é designado, é um valor que mede a resistência de um material quando este sofre uma deformação elástica, ou seja, de forma não permanente. Este parâmetro descreve a tendência de um material se deformar ao longo de um eixo quando nele são aplicadas forças opostas ao longo desse mesmo eixo. Por outras palavras, é um parâmetro de caracterização mecânica para materiais sólidos que mede a sua rigidez. Quanto mais rígido um material, maior o seu módulo de elasticidade e o seu valor é intrínseco para cada material, dependendo da composição química, microestrutura e defeitos.

Geralmente o módulo de elasticidade é definido como a razão entre a tensão exercida e a deformação sofrida pelo material mas no sal-gema não é tão fácil fazer este tipo de determinações. A determinação do módulo de elasticidade em provetes de sal-gema pode ser feita de duas formas: através de ciclos de carga e descarga em testes de compressão e neste caso chama-se módulo de elasticidade estática ou através da deformação causada por ondas ultrassónicas em ensaios com UPV e nesta forma designa-se por módulo de elasticidade dinâmico.

O método estático é o preferencial para quantificar a elasticidade no sal-gema mas a prensa que se utilizou nos ensaios de compressão não está equipada para realizar ciclos de carga e descarga, por isso sobra apenas o método dinâmico.

O módulo de elasticidade dinâmico é em geral determinado a partir da informação do valor da velocidade longitudinal e transversal de ondas ultrassónicas do tipo P e do tipo S, respetivamente. Acontece que o aparelho UPV disponível só consegue produzir ondas do tipo P. Mesmo assim, o manual do UPV possui a indicação de como calcular o módulo de elasticidade dinâmico através de uma equação que representa a relação entre a velocidade das ondas P e o módulo de elasticidade dinâmico. A expressão dessa relação é a seguinte:

$$v_P = \left[\frac{E_D}{d} \cdot \frac{(1-n)}{(1+n)(1-2n)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Rearranjando a equação (7) chega-se assim à expressão que permite determinar o módulo de elasticidade dinâmico (E_D) e obtê-lo em GPa :

$$E_D = v^2 \cdot d \cdot \frac{(1+n)(1-2n)}{(1-n)} \quad (8)$$

Onde:

E_D , é o módulo de elasticidade dinâmico (GPa),

v e v_P , são a velocidade das ondas ultrassónicas longitudinais (km/s),

d , é a densidade (g/cm^3) e

n , o coeficiente de Poisson (*adimensional*);

Entre parenteses estão indicadas as unidades em que se podem inserir os valores para obter diretamente o valor de E_D em GPa correspondente. As unidades SI usadas em geral para representar o módulo de elasticidade é o Pa (Pascal) mas também se podem apresentar em N/m^2 , sendo as duas dimensões equivalentes. A determinação do módulo de elasticidade com base equação (8) apenas é possível contando que se possui o valor do coeficiente de Poisson para o material testado. O coeficiente de Poisson comumente representado pela letra grega ν (niú) foi aqui designado pela letra n para não se confundir com a letra v do alfabeto romano, usada para denotar a velocidade. Este coeficiente caracteriza o efeito de Poisson que é um fenómeno no qual um material tende a expandir na direção perpendicular à direção de compressão ou a contrair no caso de ser esticado. Para determinar este coeficiente é necessário a informação da velocidade das ondas S, a qual não se consegue obter com o UPV disponível. Parecendo chegar a um novo impasse, a solução é apresentada no livro *Rock Mechanics in Salt Mining* e é dada por **Hansen et al. (1981)**.

O estudo realizado por Hansen *et al.* sobre o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do sal-gema de dez depósitos em locais diferentes, concluiu que os valores destes parâmetros de elasticidade não variavam significativamente entre os diferentes locais, ou seja, parecem insensíveis a variações na composição

mineralógica. Assim com base nessa constatação, admite-se como válido a determinação do módulo de elasticidade dinâmico para o sal-gema em estudo usando um coeficiente de Poisson calculado a partir da média dos parâmetros elásticos de alguns desses locais. O que irá ser obtido será um valor teórico do módulo de elasticidade dinâmico para o sal-gema do diapiro de Loulé. Ainda que em parte seja calculado a partir de dados experimentais, nomeadamente a velocidade das ondas, não poderá ser considerado como um valor experimental, mas constituirá uma boa aproximação do valor real do módulo de elasticidade.

Procedimento Laboratorial

Para determinar o módulo de elasticidade dinâmico colocaram-se os valores necessários para a utilização da expressão (8) numa folha em *Excel*. Determinou-se o E_D para cada provete, usando o valor da velocidade média registada nesse provete e o valor da sua densidade. Para o coeficiente de Poisson utilizou-se o valor médio calculado a partir dos valores de seis locais estudados por Hansen *et al.*, para completar assim os dados necessários para obter o valor E_D . A utilização dos parâmetros elásticos de apenas seis dos dez depósitos de sal-gema estudados deve-se a esses serem os únicos que possuíam os dados completos. Os outros quatro locais não possuíam o coeficiente de Poisson determinado. Os parâmetros elásticos dos seis locais utilizados encontram-se dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros elásticos de seis depósitos naturais de sal-gema (adaptado de Hansen *et al.*, 1981).

Minas	Módulo de Young (GPa)			Coeficiente de Poisson		
	Média	σ	Intervalo	Média	σ	Intervalo
Permian	26,6	3,7	19,9 – 33,4	0,33	0,05	0,24 – 0,41
Paradox	31,0	3,4	25,2 – 36,3	0,36	0,10	0,09 – 0,50
Jefferson Island	29,5	3,5	25,0 – 34,4	0,29	0,07	0,17 – 0,39
Avery Island	30,6	5,8	21,0 – 38,2	0,38	0,06	0,31 – 0,47
Richton	31,5	3,0	26,7 – 36,4	0,36	0,09	0,21 – 0,55
Vacherie	31,1	3,5	26,7 – 37,6	0,34	0,03	0,29 – 0,39
	Média			Média		
	30,05			0,34		σ = desvio padrão

Dado que se trata de uma determinação teórica do valor do módulo de elasticidade, calculou-se também o valor E_D com -10% e +10% do coeficiente de Poisson médio determinado. Esta variação serve para obter uma melhor aproximação do valor real do módulo de elasticidade com uma variação de 10% do valor teórico. Assim para o coeficiente de Poisson foi utilizado o valor de 0,34 e o intervalo de variação é entre 0,31 e 0,37 (-10% e +10%, respetivamente em relação ao valor médio). Os dados obtidos foram dispostos em gráficos separados para cada série de resultados.

7.4 Resistividade Elétrica

Fundamento Teórico

Resistividade elétrica ou resistência elétrica específica é uma propriedade intrínseca de um material e mede o nível de oposição à passagem da corrente elétrica através desse material. Uma resistividade elétrica baixa representa uma passagem fácil da corrente elétrica. Por isso mesmo a resistividade é o recíproco da condutividade elétrica, que quantifica a facilidade de um material em conduzir a corrente elétrica, ou seja, as duas propriedades são inversamente proporcionais. A resistividade é em geral representada pela letra grega ρ (ró) e obtida nas unidades SI em $\Omega.m$ (ohm-metro).

A resistividade elétrica de um material está muito relacionada com as ligações químicas presentes e por isso é um dos indicadores mais sensíveis nas alterações dessa natureza. Em geral admite-se que a resistividade elétrica é inversamente proporcional à densidade e mobilidade de um material. Pois sabe-se que uma mudança na natureza das ligações químicas provoca alterações na densidade e uma mudança na estrutura altera a sua mobilidade.

Para medir a resistividade elétrica existem vários métodos e a escolha para obter os melhores resultados passa principalmente por dois fatores: a forma da amostra e a resistência dos contactos. Para este trabalho testaram-se dois métodos nos provetes de sal-gema. O primeiro designou-se por método da sanduiche de eléctrodos e o segundo por método dos quatro contactos, como este ultimo apresentava resultados mais estáveis a escolha caiu sobre ele. A teoria de base é a mesma para os dois métodos, apenas a aplicação é um pouco diferente. A descrição do aparato utilizado para o primeiro método encontra-se na secção a seguir sobre o procedimento.

O método de quatro contactos consiste em 4 parafusos ligados aos provetes de sal-gema em quatro pontos diferentes, como mostra a Figura 39. Os parafusos encontram-se ligados a um resistivímetro que injeta uma corrente elétrica (I) no provete através dos parafusos laterais e mede os valores da diferença de potencial (V_D) em cada passagem nos parafusos interiores. Essa informação é apresentada num computador que se encontra ligado ao resistivímetro, através de um *software* próprio.

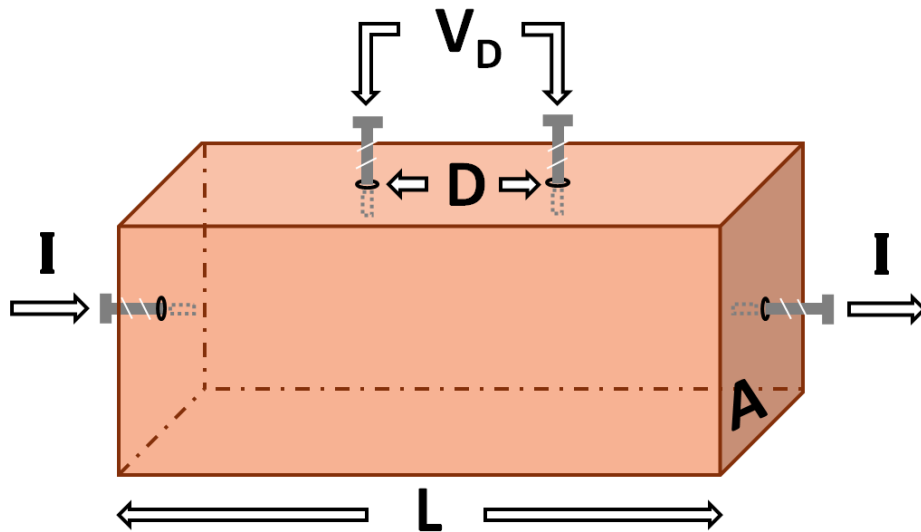


Figura 39 – Esquema exemplificativo da aplicação do método dos quatro contactos utilizado nos ensaios de resistividade elétrica. (Crédito: Criação do autor)

A resistividade elétrica é obtida através seguinte da equação:

$$\rho = \frac{V_D \cdot A}{I \cdot D} \quad (9)$$

Onde:

ρ , é a resistividade de elétrica ($\Omega \cdot m$),

V_D , é a diferença de potencial medido entre a distância D ($V [volt]$),

A , é a área da base do provete (m^2),

I , é a corrente elétrica ($A [ampere]$),

D , é a distância entre dois parafusos na face superior do provete (m),

e na figura, L , é o comprimento do provete (m);

A principal diferença entre os dois métodos testados é que o primeiro só utilizava dois pontos de contacto (um em cada base do provete) e a diferença de potencial era medida entre esses dois extremos. Nesse caso, na equação da resistividade era utilizado o valor L para a distância. No método de quatro contactos, a diferença de potencial é medida nos dois pontos interiores e isso elimina os efeitos da

resistência de contacto entre a amostra e os contactos elétricos, produzindo medidas com maior precisão.

Uma análise da resistividade elétrica do sal-gema da mina de Loulé foi efetuada em 1985 num estudo geoeletrico efetuado no diapiro (**Moreira, 1985**). Os ensaios executados nessa altura revelaram um carácter altamente resistivo do sal-gema, como era esperado. Tendo-se obtido valores na ordem de 10^1 a $10^4 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ para a resistividade elétrica. O autor concluiu também que estas resistividades manifestavam-se nas curvas de campo por um ramo ascendente assintótico, com 45° de inclinação.

Descrição do Aparato e Procedimento Laboratorial

Para medir a resistividade elétrica do sal-gema começou-se por estudar qual seria o procedimento mais adequado para a natureza do estudo. A forma mais simples para medir esta propriedade é fazer a medição da diferença de potencial entre dois contactos situados em lados oposto. Por isso desenvolveu-se um método que se designou por sanduíche de eléctrodos.

O aparato deste modelo consistia em dois quadrados de uma fita de cobre, ligados ao resistivímetro por um cabo, que iriam funcionar como transmissor e recetor da corrente elétrica e que eram colocados em lados opostos nos extremos do provete. A diferença de potencial era medida entre duas espirais de cobre que ficavam em contacto com o provete e que também eram ligadas ao resistivímetro e eram colocadas nas mesmas faces que as fitas de cobre. Entre a fita de cobre e a espiral de cobre estava um disco de algodão humedecido, em ambos os lados, apresentando-se desta forma como uma sanduíche. A visão geral do aparato pode ser vista na Figura 40.

O problema deste método estava no fluxo da corrente elétrica que, apesar de mostrar resultados com alguma coerência, o intervalo de valores medidos era muito elevado. Isso sugeria que a passagem da corrente através do sal-gema ou dos contactos não era a melhor. Além do mais, a utilização de discos de algodão humedecidos introduzia alguma alteração na percentagem de humidade presente no sal-gema. Por isso optou-se por fazer uma abordagem um pouco mais invasiva em termos físicos mas que não produzia alterações significativas nas propriedades do sal-gema.

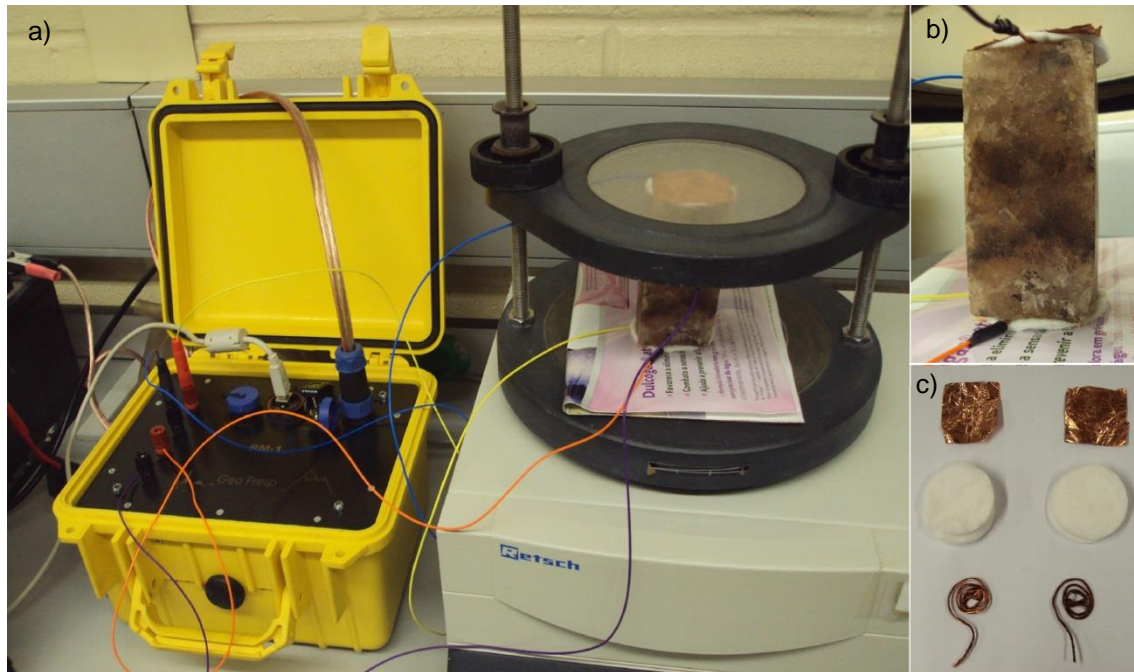


Figura 40 – Aparado do primeiro método experimentado para medir a resistividade elétrica; **a)** Aparato do método da sanduiche de elétrodos. O resistivímetro é a caixa amarela que se encontra ligado ao provete de sal-gema e o provete encontra-se seguro e espalmado entre duas bases; **b)** Visão pormenorizada do provete de sal-gema entre as duas bases. Notar a disposição empilhada dos elétrodos; **c)** Vista separada de cada componente dos elétrodos. (Créditos: Fotografias do autor)

Como já mencionado anteriormente, o método de quatro contactos foi então o modelo escolhido para realizar os ensaios da resistividade elétrica. O conjunto de aparelhos utilizado nestes ensaios encontra-se apresentado na Figura 42.

Mas antes de se efetuarem os ensaios, os provetes tiveram de ser previamente preparados para se poderem ligar ao resistivímetro. Utilizando uma broca com 1 mm de diâmetro fizeram-se quatro furos com uma profundidade de 3 a 4 mm em cada provete, um no centro de cada base e os outros dois numa das faces maiores. Este processo é mostrado na Figura 41. Os dois orifícios na face maior encontram-se a uma distância de 1/3 e 2/3 relativamente ao comprimento total do provete. Assim a distância D entre os dois parafusos para os três comprimentos L dos provetes é:

$$L = 10 \text{ cm} \rightarrow D = 3,3 \text{ cm}$$

$$L = 12,5 \text{ cm} \rightarrow D = 4,1 \text{ cm}$$

$$L = 15 \text{ cm} \rightarrow D = 5 \text{ cm}$$

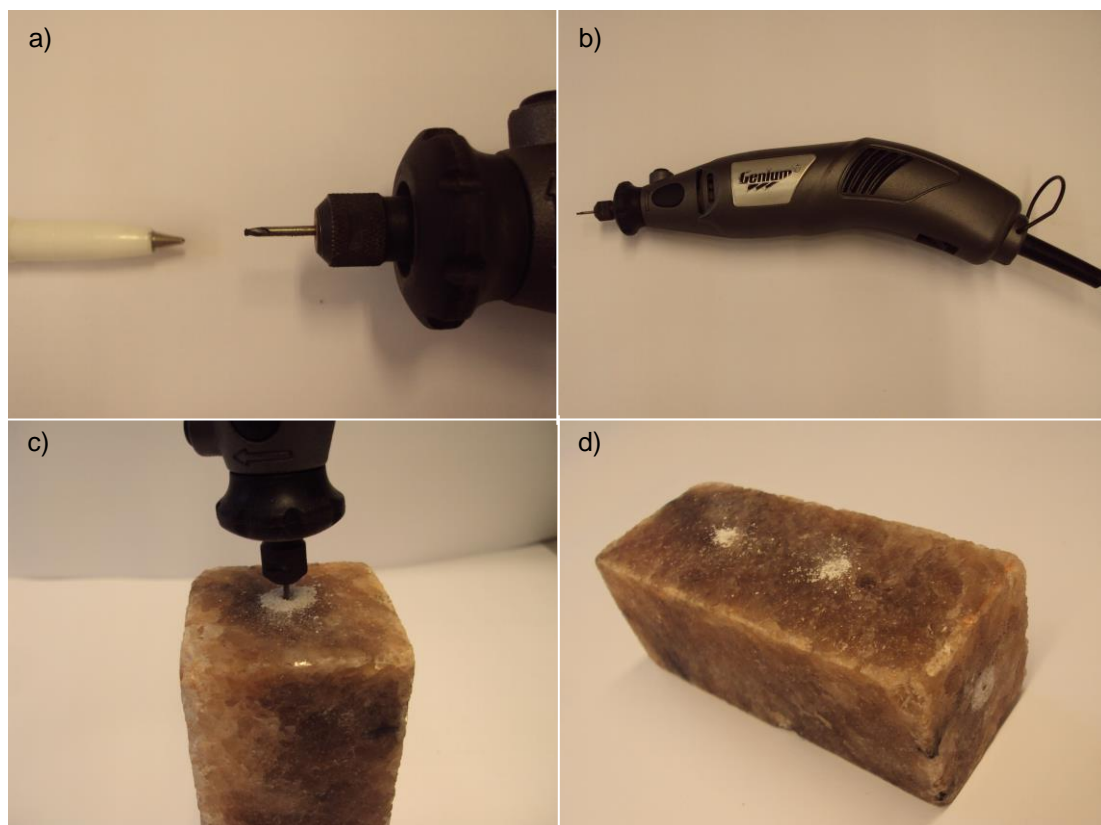


Figura 41 – Sequência de fotografias mostrando o processo de furar os provetes; **a)** Broca de 1mm de diâmetro; **b)** Berbequim e utilizado para fazer os orifícios; **c)** Proвете de sal-gema a ser furado numa das bases; **d)** Proвете com os quatro orifícios preparados para o ensaio de resistividade elétrica. (Créditos: Fotografias do autor)

O resistímetro é ligado a uma bateria que funciona como a fonte da energia elétrica. Depois usando uma configuração de fios específica com garras metálicas nas pontas e que se encontram ligados ao resistímetro, ligam-se aos parafusos de aço inoxidável que já tinham sido inseridos nos orifícios. Os dois parafusos de lado funcionam como transmissor e recetor da corrente e nos dois parafusos do meio é medida a diferença de potencial da corrente que os atravessou. Para corrigir erros de voltagem causados pelas diversas partes do circuito, automaticamente o aparelho faz passar um fluxo de corrente no sentido inverso através do sal-gema. Durante os ensaios, os provetes de sal-gema foram colocados assentes sobre duas arestas de um recipiente de plástico e ficavam assim em suspensão durante o teste (Fig. 43c). Esta medida era para eliminar a interferência que poderia haver se fossem colocados sobre uma superfície com alguma condutividade elétrica.

As especificações da corrente e os valores medidos são apresentados no ecrã do computador, que se encontra ligado ao resistímetro, através de um *software* próprio denominado RM1b. O sinal de entrada que se definiu no RMb1 para a corrente

elétrica foi de 50 volts, depois disso foi só executar o programa e registar os valores medidos. Dos valores apresentados no computador usou-se o valor da corrente elétrica (I) que atravessou o provete e a diferença de potencial (V_D) medida entre os dois parafusos interiores. Com o valor da área das bases (A) e a distância entre os parafusos (D), obtém-se assim através da expressão (9) o valor da resistividade elétrica em unidades SI. O *software* RMb1 também apresenta o percurso da corrente através do provete na forma de onda (Fig. 43a).

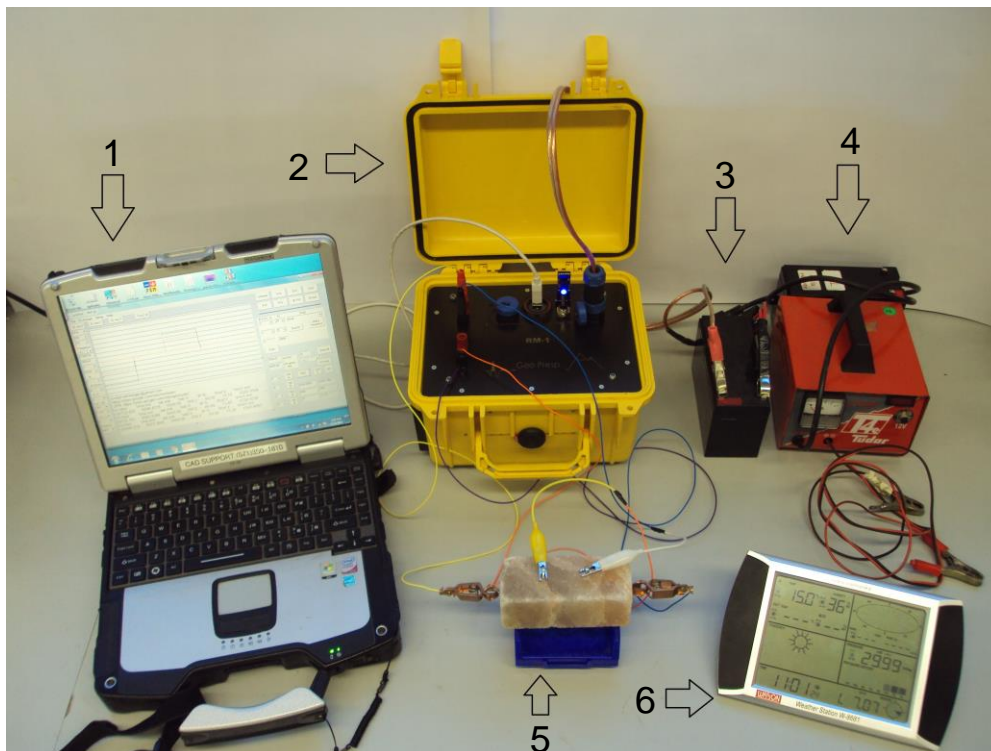


Figura 42 – Aparato dos ensaios de resistividade; 1 - Computador com o *software* RMb1; 2 - Resistivímetro; 3 - Bateria do resistivímetro; 4 - Carregador da bateria; 5 - Provete com o circuito de fios ligado; 6 - Termómetro digital para medir a temperatura ambiente e da humidade relativa. (Créditos: Fotografias do autor)

Na fase de experimentação deste método, o intervalo de valores medidos também se mostrava muito grande (ainda que menor que o primeiro método). A troca por uma nova bateria e o cuidado de a manter sempre com a carga completa resolveu em grande parte este problema. Também para testar se o resistivímetro estava a funcionar bem, ligaram-se ao aparelho resistências de teste por onde se fez passar corrente elétrica (Fig. 43b). Testaram-se resistências de dois valores diferentes, de 10 ohms e de 670 ohms. Os valores medidos mostraram-se a par dos valores padrão e portanto concluiu-se que o resistivímetro estava calibrado.

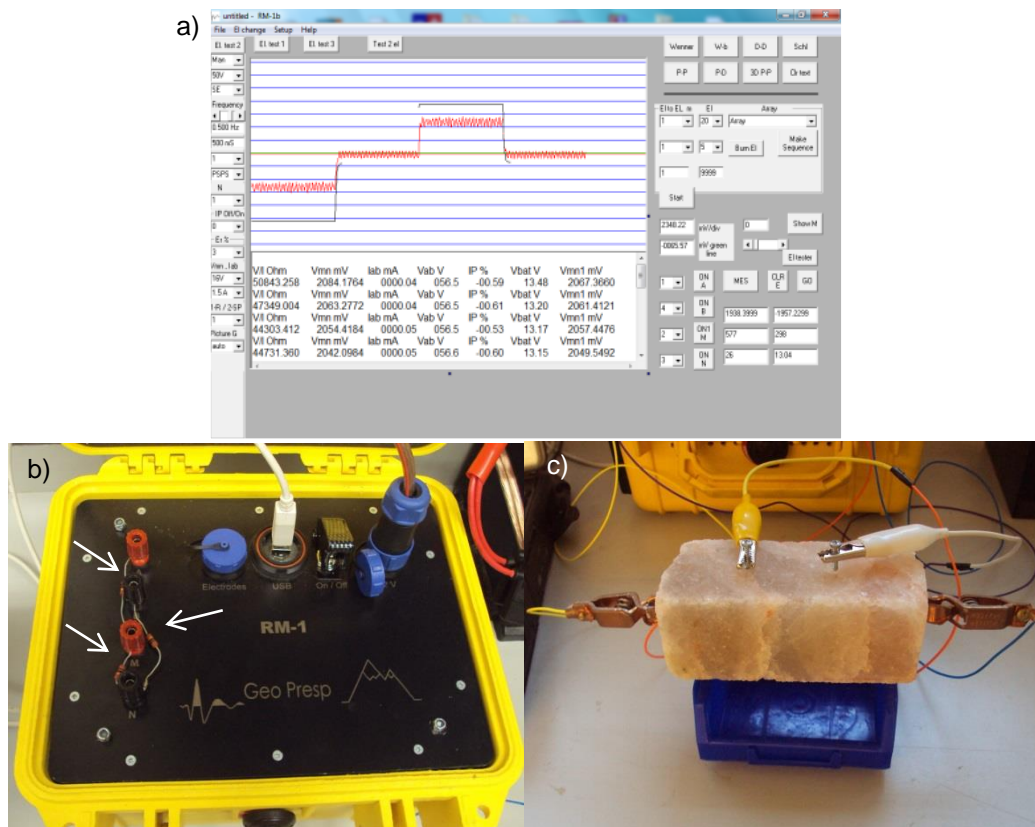


Figura 43 – Pormenores dos ensaios de resistividade; **a)** Pormenor da interface do software RMb1 onde é possível observar a forma da onda do sinal elétrico recebido durante o teste; **b)** Pormenor do resistivímetro durante a calibração com as resistências de teste (indicadas pelas setas); **c)** Pormenor do provete em suspensão durante os testes de resistividade elétrica. (Créditos: Fotografias do autor)

Também se testou se os parafusos influenciavam os valores medidos e para isso pintou-se o topo de cada um com cores diferentes de forma a diferenciá-los e depois realizaram-se alguns ensaios. Observou-se que não havia uma influência detetável, pelo que se usaram os parafusos de forma aleatória e sem a coloração.

Como o sal-gema absorve facilmente a humidade do ar e este é um fator que influencia fortemente os valores obtidos para a resistência elétrica, procedeu-se também a um controlo da resistividade em três provetes de composição mineralógica relativamente diferente que se colocaram expostos à atmosfera da sala. O objetivo era observar como iriam variar os valores medidos conforme o sal-gema dos provetes ia absorvendo humidade. Para que os três provetes, que já tinham sido expostos à atmosfera por períodos de duração diferente, iniciassem o controlo com relativamente a mesma percentagem de humidade colocaram-se os três numa estufa a 60° a aquecer durante 30 minutos. Depois retiraram-se e deixaram-se arrefecer até à temperatura ambiente antes de realizar as primeiras medições de controlo, pois a

temperatura é outro fator que influencia o valor da resistividade. Este controlo foi realizado num período de cerca de 4 semanas durante o qual se fizeram dez medições de resistividade em cada um dos três provetes. A par disso também se registaram os valores da temperatura ambiente e da humidade relativa da atmosfera da sala em cada dia de controlo. Os três provetes de controlo são mostrados na Figura 44.



Figura 44 – Provetes de controlo utilizados para observar a influência da absorção da humidade nos valores da resistividade elétrica medida. Os três provetes são da série 1, com a respetiva identificação por baixo, e apresentam uma composição mineralógica diferente que se traduz num comportamento díspar na absorção da humidade do ar. (Créditos: Fotografias do autor)

Um aspeto melhorado no procedimento deste método entre a primeira fase de ensaios e a segunda fase teve a ver precisamente com humidade presente no sal-gema. Na primeira fase, os ensaios de resistividade foram realizados depois dos ensaios com os ultrassons e já passadas algumas semanas depois de serem serrados. Isso significa que o gel de contacto utilizado na superfície dos provetes introduziu alterações no sal-gema e no tempo decorrido os níveis de humidade também se alteraram. Na segunda fase o objetivo era medir a resistividade do sal-gema com os níveis de humidade com que ele se encontrava na mina. Para isso os ensaios com o resistímetro na segunda fase foram realizados em cada provete no mesmo dia em que eles eram cortados ou, em alguns casos em que isso não foi possível, na manhã seguinte. Desta forma os valores obtidos são mais próximos das condições originais.

Com os resultados obtidos procedeu-se à elaboração de um gráfico para cada série e fez-se um estudo com os dados obtidos do controlo da humidade.

7.5 Resistência à Compressão Uniaxial

Fundamento Teórico

A resistência à compressão uniaxial ou compressão simples é a medida da resistência que um material oferece quando sujeito a uma força de compressão, sob certas condições, até ocorrer rotura. Por outras palavras, representa a carga limite ou a força máxima que uma rocha consegue suportar em função da área até que este se fracture, momento esse em que atinge o seu pico de resistência. Na natureza as rochas estão sujeitas a estados de compressão triaxial, no entanto os ensaios uniaxiais continuam a ter interesse porque simulam o comportamento mecânico de uma rocha em certas situações como por exemplo em pilares ou colunas em escavações subterrâneas como se passa na mina em estudo. A resistência à compressão uniaxial é geralmente representada pela letra grega σ_c (sigma) com um c pequeno que se refere à compressão e representa-se em unidades SI como kN/m^2 ou como kPa . O seu valor é determinado pelo quociente entre a força compressiva aplicada (F_c) e a área de aplicação da força, ou seja a área das bases (A) como representado na expressão seguinte:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (10)$$

Onde:

σ_c , é a resistência à compressão uniaxial (kPa ou kN/m^2),

F_c , é a força compressiva aplicada (kN) e

A , é a área das bases (m^2);

No laboratório a resistência à compressão é determinada num provete com características e dimensões padronizadas. Para realizar ensaios de resistência em rochas existem normas publicadas pela *International Society for Rock Mechanics (ISRM)* e pela *American Society for Testing Materials (ASTM)*. Ainda que o sal-gema seja uma rocha, ele não se comporta inteiramente como a maioria e por isso recorreu-se à obra *Rock Mechanics in Salt Mining (RMSM)* para compreender quais os pontos que deviam ser seguidos e quais as alterações que deviam ser feitas.

Pelo livro *RMSM* compreende-se que este tipo de ensaio é o mais comum para determinar a força do sal-gema. A forma que os provetes podem ter neste tipo de

testes pode ser cilíndrica ou prismática e como tal adotou-se a forma de prisma quadrangular para os provetes deste estudo. O valor obtido para a resistência depende de algumas variáveis como a forma do provete, o tamanho, a porosidade do sal-gema, a percentagem de humidade, a composição mineral e outros. Além disso variações no valor existem não apenas para diferentes depósitos de sal como dentro do mesmo depósito. Como tal e de forma a testar a dimensão adequada para o sal-gema em estudo, foram ensaiadas três dimensões diferentes. A *ASTM* indica que a largura ou o diâmetro da base deve ser no mínimo 50 *mm* e comprimento deve ser 2 a 2,5 vezes superior à largura da base. Já a *ISRM* aconselha um comprimento 2,5 a 3 vezes superior à largura. O livro *RMSM* diz que o efeito do tamanho na força exercida se torna constante a partir de tamanhos mais pequenos em comparação com as rochas de outros minerais. Logo em princípio bastaria realizar os ensaios de compressão com a razão base-altura 1:2, que é a razão mínima para os ensaios com rochas em geral. Mas pretendeu-se testar razões base-altura diferentes para observar se havia variação. Decidiu-se por isso testar três comprimentos diferentes em função de uma base de largura fixa que ficou decidida como sendo de 5 *cm*, o mínimo estabelecido. Seria desejável que a largura da base fosse pelo menos 10 *cm* mas tal tornaria difícil de obter provetes com a altura necessária na maioria das amostras disponíveis. As alturas testadas foram 10, 12,5 e 15 *cm* e os provetes com estas dimensões tinham um rácio base-altura correspondente a 1:2, 1:2,5 e 1:3 respetivamente. Depois de se submeterem à compressão os provetes da primeira fase, ficou escolhida a altura de 12,5 *cm* como a dimensão padrão para os provetes da segunda fase.

Para se obterem bons resultados durante a compressão numa prensa, as normas referem que as faces devem ser lisas e regulares e as bases têm de ser perpendiculares ao eixo vertical. A velocidade ou taxa com que a carga é aplicada sobre o provete deve estar entre 0,5 a 1 *MPa/s* como recomendado pela *ISRM*.

Depois de se terem provetes normalizados a execução dos ensaios de resistência à compressão é relativamente simples. Apesar disso é necessário algum cuidado na interpretação dos resultados, pelas razões acima referidas. Os resultados dependem em grande parte da natureza, da composição e das condições dos provetes de teste, características estas que se mostram pouco constantes no sal-gema estudado.

Procedimento Laboratorial

O equipamento que se utilizou nos ensaios de resistência à compressão uniaxial foi uma prensa de compressão com controlo hidráulico da marca *Controls*, modelo 50-C56L2, e com uma capacidade de 3000 kN (Fig. 45a). No interior da prensa há um cilindro de carga ligado a um pistão hidráulico e dois pratos onde o provete fica alojado durante o teste. Ligado à prensa encontra-se uma unidade de *WIZARD Basic* (Fig. 45b) que é um microprocessador de leitura digital e é nele que são apresentadas as medições da força de compressão exercida durante os ensaios. O equipamento é apresentado na Figura 45 seguinte.



Figura 45 – Equipamento utilizado nos ensaios de compressão uniaxial; **a)** 1 - Prensa de compressão uniaxial; 2 - Microprocessador de leitura digital WIZARD Basic; 3 - Válvula de controlo manual da taxa de compressão; 4 - Manivela B que controla a velocidade de subida do cilindro de compressão inferior, a manivela A encontra-se por detrás da válvula; **b)** Vista aproximada do microprocessador de leitura digital onde era apresentada a informação durante os testes de compressão; **c)** Pormenor de um provete colocado no centro dos pratos antes do teste de compressão uniaxial. (Créditos: Fotografias do autor)

A normalização das dimensões dos provetes ocorreu na fase da serragem e portanto nesta etapa os provetes já se encontravam aptos para o teste. Antes de iniciar os ensaios define-se no *WIZARD Basic* a área das bases dos provetes e a taxa da carga que vai ser aplicada. A área introduzida foi 2500 mm^2 , que corresponde à área de um quadrado de 50 mm de lado, e a taxa de carga que se introduziu foi de 0,5 MPa/s. Só foi necessário colocar esta informação no início uma vez pois ela fica guardada para todos os testes seguintes até ser alterada outra vez.

Cada provete foi colocado na vertical no interior da prensa e alinhado com o centro dos pratos. A prensa possui uma porta que era necessário estar fechada para o equipamento começar a trabalhar. Assim depois de fechar a porta podia ligar-se o equipamento para iniciar o teste. Para executar o teste de compressão existem duas manivelas e uma válvula que controlam a pressão hidráulica e a velocidade da aplicação da carga. Diferentes posições das manivelas permitiam fazer subir ou descer o cilindro de compressão e a posição correta para cada etapa do teste estava indicada no manual do equipamento. O controlo da válvula devia ser feito ao mesmo tempo em que decorria a compressão e servia para aumentar ou diminuir a taxa da carga aplicada corrigindo em tempo real os valores apresentados no leitor digital. A correção que devia ser aplicada era indicada no ecrã digital através de símbolos “+”, “-” e “=”, indicando se se devia aumentar, diminuir ou manter a taxa de carga. Quando o provete atingia o pico de resistência e começava a fraturar, o valor da força aplicada apresentado no leitor digital parava e era apresentado o valor para a força de compressão máxima que tinha sido suportada pelo provete em kN. O valor da resistência à compressão também era apresentado no ecrã em MPa, e era determinado através do valor da área da base previamente introduzido. No fim do teste, estes valores eram registados e o provete era retirado com cuidado e colocado na bancada de trabalho onde era feito um registo fotográfico das fraturas. Este processo foi repetido para cada provete e executado inteiramente num só dia de trabalho de forma a manter as mesmas condições de teste. A Figura 46 mostra alguns exemplos de provetes faturados no fim dos testes de compressão.

Como mencionado antes, na primeira fase ensaiaram-se provetes com três alturas diferentes (10, 12,5 e 15 cm). O rácio base-altura mais desejado era o 1:2,5 por ser o intermédio das razões aconselhadas nas duas normas e portanto o que se pretendia observar era se os resultados dos provetes com os outros dois rácios iriam ser muito diferentes. O que se verificou na primeira fase foi que o intervalo de valores era relativamente semelhante para cada rácio e por isso ficou resolvido fazer de 12,5

cm a altura padrão. Os provetes da segunda série de ensaios tinham quase todos 12,5 cm de altura com a exceção de três provetes de 10 cm como já foi explicado antes.

O equipamento já devolvia o valor da resistência à compressão por isso bastou construir um gráfico para cada série de resultados com esses valores. Fez-se depois uma análise do tipo de fraturas e tentou-se encontrar relações com os dados obtidos.

Os valores da temperatura ambiente e da humidade relativa nos dias dos ensaios foram, respetivamente, 17 °C e 60% na primeira fase e 20 °C e 65% na segunda fase.

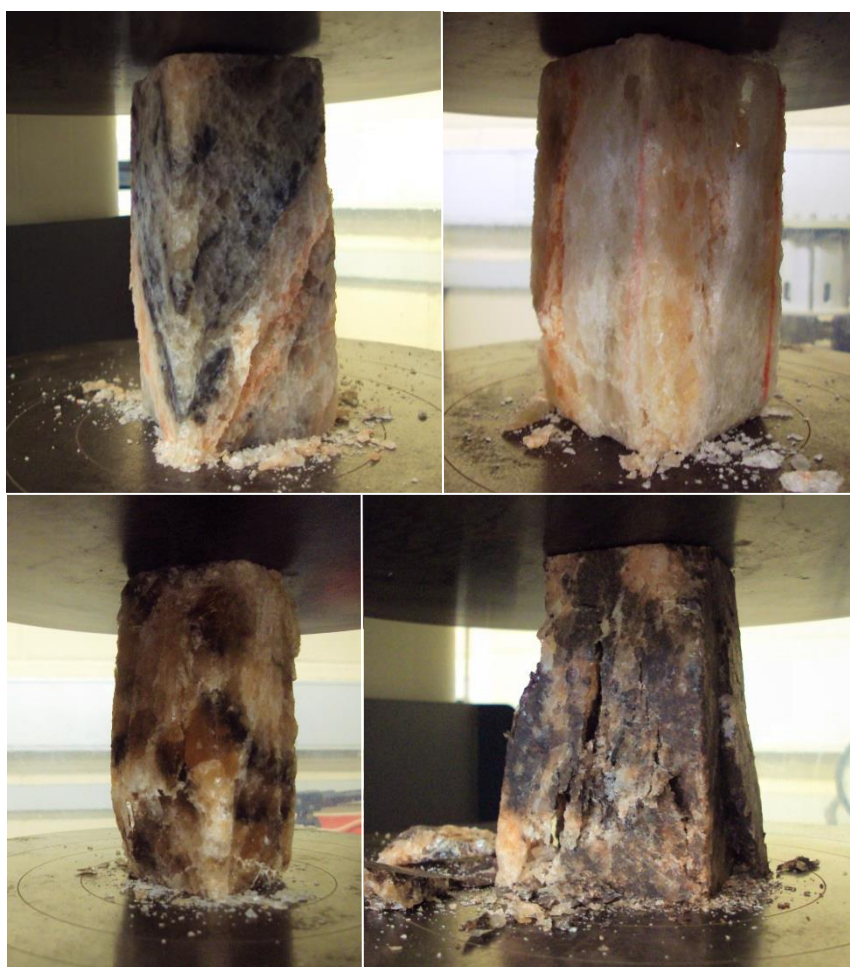


Figura 46 – Exemplos do estado fraturado dos provetes após os ensaios de compressão uniaxial. (Créditos: Fotografias do autor)

8. Resultados e Discussão

Como nota para esta secção e de forma a evitar confusões, os resultados dos provetes da primeira fase são designados por “Série 1”, ou seja, referente à primeira série de resultados. Da mesma forma, a designação “Série 2” é usada para os resultados dos provetes da segunda fase.

Os gráficos apresentados mostram a variação de cada parâmetro ao longo do eixo N-S da mina e sabendo que os primeiros provetes pertencem à zona norte e os últimos à zona sul, é fácil visualizar como os valores variam ao longo do conjunto de câmaras centrais. A maioria dos gráficos apresentados contém uma linha de tendência linear para ajudar a visualizar qual a tendência que a média dos valores toma ao longo da mina. Para cada reta de tendência é apresentada a respetiva equação onde através do coeficiente angular é possível perceber o declive da reta (equação do tipo $y = mx + b$; m é o coeficiente angular).

As tabelas com os valores de medição, de cálculos intermédios e valores finais, encontram-se no Apêndice A no final do trabalho, separadas para cada método de caracterização.

A numeração de provetes apresentada no eixo horizontal dos gráficos, não corresponde à totalidade do conjunto, a lista inteira dos dois conjuntos pode ser consultada nas tabelas do Apêndice A. A numeração dos provetes aparece num intervalo de dois a dois para simplificar a leitura do gráfico.

8.1 Densidade

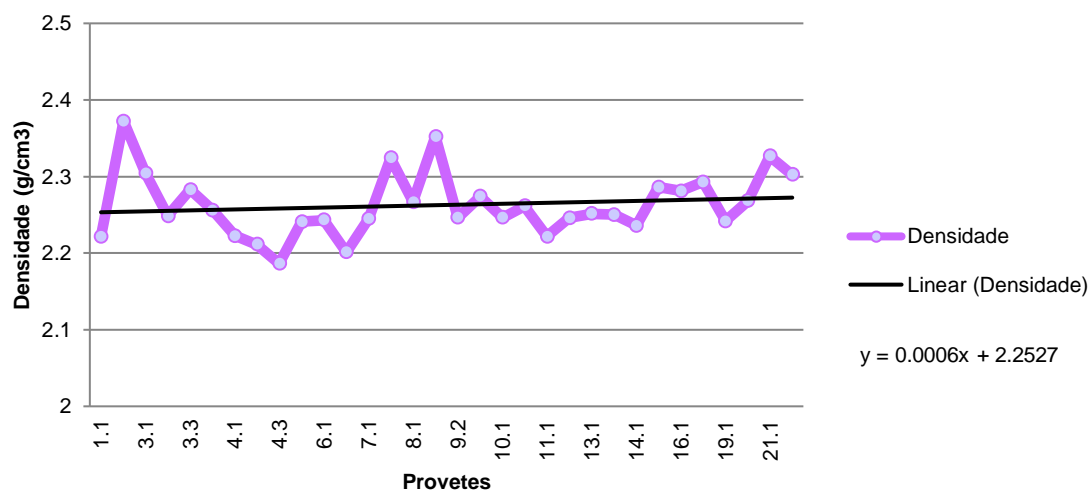
Os valores da densidade de cada provete foram dispostos em gráficos separados para cada série (Gráficos 1 e 2). A grande diferença que se nota entre os dois gráficos é na variação dos valores, algo mais evidente nos valores da série 1. Como já foi referido antes, o valor mínimo com que se pôde precisar o peso dos provetes na primeira fase foi de 50 gramas. Isso resultou numa menor precisão do valor da densidade em comparação com os resultados da série 2, onde a maioria dos valores se encontra no intervalo de 2,2 a 2,3 g/cm^3 , que é metade do tamanho do intervalo onde se encontram a maioria dos valores da série 1 (2 a 2,2 g/cm^3). A mudança para uma balança digital aumentou para o dobro a precisão dos resultados.

Determinando a média da densidade de todos os valores obtidos, chegou-se aos valores de referência para a densidade do sal-gema: $2,10 \text{ g/cm}^3$ para a série 1 e $2,26 \text{ g/cm}^3$ para a série 2. Em unidades SI a densidade é 2100 kg/m^3 e 2260 kg/m^3 para cada uma das séries, respetivamente.

Gráfico 1 – Densidade do sal-gema (Série 1).



Gráfico 2 – Densidade do sal-gema (Série 2).



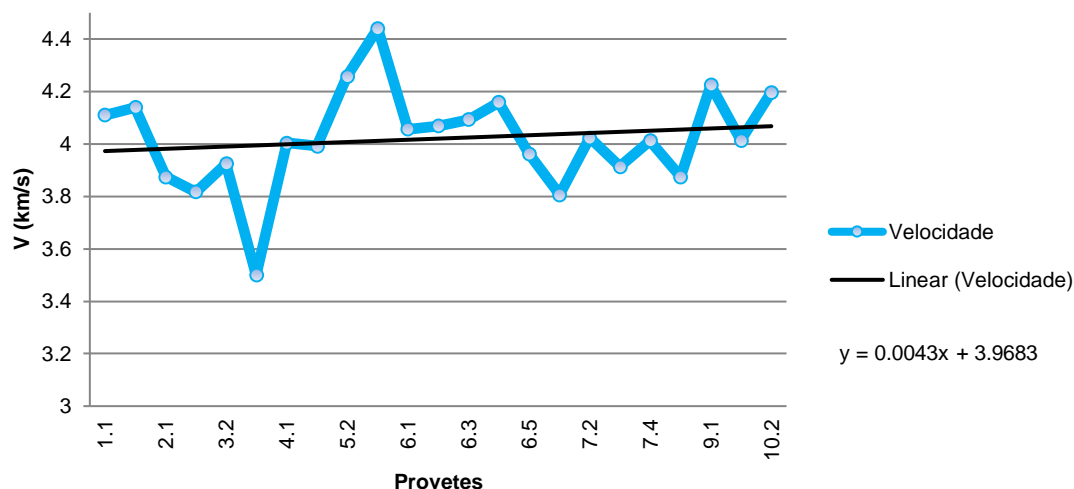
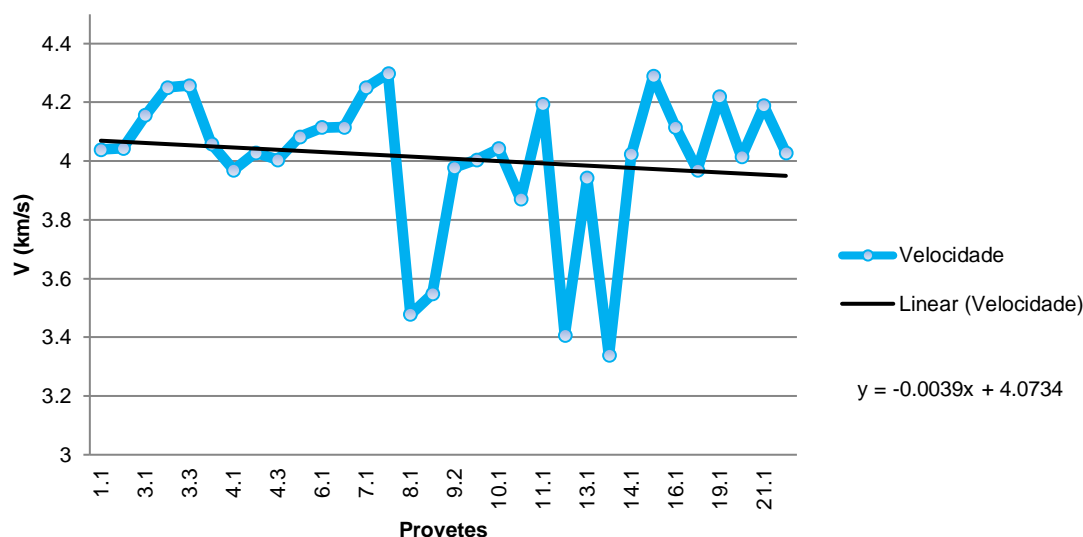
No geral a densidade mantém-se com poucas variações no sal-gema de toda a mina, mas na visualização de ambos os gráficos observa-se um ligeiro aumento da densidade em direção ao sul. Ainda que pareça que o aumento na série 1 é acentuado, consultando o declive da respetiva reta de tendência observa-se que é quase zero, ou seja, o declive é praticamente horizontal. O ligeiro aumento é

confirmado pela composição do sal-gema que apresenta em geral uma maior percentagem de argilito na zona sul em comparação com o resto da mina. O argilito possui menor densidade que a halite mas na mistura dos dois, o argilito preenche as cavidades entre os cristais de halite e torna o sal-gema mais compacto e por sua vez mais denso. Por comparação e também porque mais de 90 % da sua composição é halite, a densidade da halite é $2,1 \text{ g/cm}^3$. Além disso consultando valores de referência da densidade de outros depósitos de sal, verifica-se que a densidade determinada para o sal-gema em estudo está dentro dos valores conhecidos para a densidade desta rocha.

Nos resultados da série 1 não estão incluídos os dados dos provetes com a forma de cubo. A densidade deles foi determinada mas verificou-se que os valores de cinco dos sete cubos eram *outliers* em relação aos provetes com a forma de prisma. Quatro dos cinco *outliers* possuíam valores de densidade muito baixos, entre $1,58$ a $1,96 \text{ g/cm}^3$, o quinto possuía o valor mais elevado do conjunto com $2,38 \text{ g/cm}^3$. O valor elevado deste último cubo deve-se a este pertencer à zona sul da mina e por isso possuir uma boa percentagem de argilito na sua constituição, a densidade baixa dos outros quatro cubos revelou-se uma surpresa sendo a sua constituição quase só halite, sem argilito. A explicação pode estar relacionada com a sua dimensão pequena ($5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$) e algum descompactamento que possa ter ocorrido quer antes ou depois da serragem.

8.2 Velocidade de propagação de ondas

Na determinação dos valores para a velocidade de propagação de ondas longitudinais (ondas P) no sal-gema obteve-se a média de $4,02 \text{ km/s}$ na série 1 e $4,01 \text{ km/s}$ na série 2. O intervalo de valores obtidos também é muito semelhante, sendo $3,5 - 4,4 \text{ km/s}$ para a série 1 e $3,3 - 4,3 \text{ km/s}$ para a série 2. Comparando nos dois gráficos (Gráficos 3 e 4), os valores para a velocidade dos provetes iniciais com os valores dos finais observa-se que não há uma variação significativa entre eles, pois mantêm-se no mesmo intervalo de valores. Mas na zona central dos gráficos observam-se alguns picos de grande variação. Os picos de valores mais baixos estão relacionados com fraturas que existiam no sal-gema ao longo dos provetes ou com sal-gema menos compacto que retardavam a propagação das ondas. Os valores mais elevados são observados em provetes com uma composição quase só de halite e com a aparência de serem um pedaço de sal-gema inteiro sem descontinuidades e muito homogêneos.

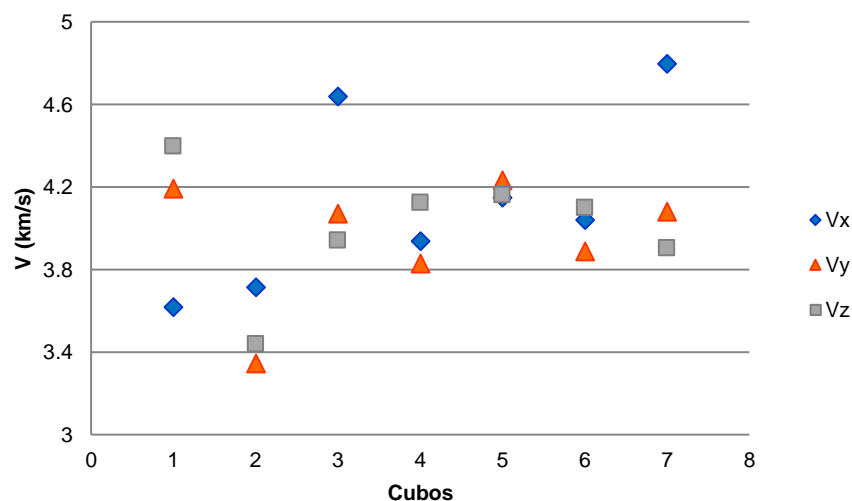
Gráfico 3 – Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas no sal-gema (Série 1).**Gráfico 4** – Velocidade de propagação de ondas ultrassónicas no sal-gema (Série 2).

Um exemplo de um estudo semelhante realizado por **J. Zong et al. (2015)** sobre a velocidade de ondas ultrassónicas no sal-gema de um depósito no Golfo do México, mostrou um intervalo de valores de 4,43 a 4,75 km/s para a velocidade das ondas P. Comparando com os dados de outros estudos sobre a mesma propriedade observa-se que os valores para a velocidade de propagação de ondas P em sal-gema encontra-se entre os 3 e os 5 km/s , por isso os resultados obtidos estão perfeitamente dentro dos valores esperados para este parâmetro. Conclui-se portanto que ondas sísmicas do tipo P que atravessem o diapiro de Loulé, viajam a uma velocidade média de 4 km/s ou em unidades SI a 4000 m/s .

Anisotropia

Na primeira fase do trabalho foram cortados sete provetes em forma de cubo com 5 cm de largura para analisar a anisotropia do sal-gema. Os dados dos cubos foram tratados em separado do resto do conjunto de provetes da série 1 e os valores deles obtidos estão apresentados no Gráfico 5. Os sete cubos também são representativos do sal-gema ao longo do eixo N-S da mina pois pertencem a amostras diferentes e de locais espaçados. Diferente dos gráficos 3 e 4, que apresentam os valores médios da velocidade de cada provete resultante da média das velocidades determinadas nos três eixos ortogonais (X, Y e Z), o Gráfico 5 apresenta as três velocidades medidas em cada cubo de forma a melhor observar a uniformidade entre os valores. O que se verifica é que por vezes as três velocidades são quase coincidentes, mas na maioria dos casos um dos valores encontra-se mais afastado enquanto os outros dois se encontram mais próximos um do outro. Ao observar os diferentes valores das velocidades de propagação em direções ortogonais para os outros provetes (Apêndice A, Tabelas A3 e A4), verifica-se que o comportamento observado nos valores dos cubos reflete todo o conjunto de resultados, onde na maioria dos casos duas direções apresentam valores para a velocidade mais próximos em relação à terceira direção. Nos provetes em forma de prisma essa proximidade observava-se na velocidade medida através da altura do prisma, isto é, V_z e uma das outras duas direções, V_x ou V_y . Coincidentemente também nos cubos se observa essa relação entre a direção escolhida aleatoriamente como Z com uma das outras (neste caso predomina a relação com a direção Y).

Gráfico 5 – Velocidades de propagação de ondas ultrassónicas nos cubos de sal-gema nas três direções ortogonais X, Y e Z (Série 1).



Desta forma pode-se afirmar que o sal-gema do diapiro de Loulé possui um certo grau de anisotropia na velocidade de propagação das ondas, pois não é igual em todas as direções. Pelo que foi possível entender a manifestação desta anisotropia está associada com a presença de descontinuidades como a estratificação. Nos cubos de sal-gema homogéneo as três velocidades apresentam-se geralmente com valores mais próximos.

8.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED)

Os valores determinados para o Módulo de Young, preferencialmente designado por módulo de elasticidade dinâmico devido ao método com que foi determinado, estão sumariados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores determinados do módulo de elasticidade dinâmico para o sal-gema do diapiro de Loulé

Coefficiente de Poisson		E_D (GPa) – Série 1			E_D (GPa) – Série 2		
		Média	σ	Intervalo	Média	σ	Intervalo
Médio	0,34	<u>22,13</u>	2,22	16,2 – 26,9	<u>23,72</u>	2,76	16,3 – 27,9
-10%	0,306	<u>24,87</u>	1,89	13,8 – 22,9	<u>26,66</u>	3,1	18,3 – 31,3
+10%	0,374	<u>18,84</u>	2,4	18,2 – 30,2	<u>20,2</u>	2,35	13,3 – 23,7

σ = desvio padrão

Tem-se assim para o sal-gema do diapiro de Loulé os valores teóricos de 22,13 GPa da série 1 e 23,72 GPa da série 2 para o módulo de elasticidade, sendo provável que os valores reais se encontrem entre 18,84 e 24,87 GPa para a série 1 e 20,2 e 26,66 GPa para a série 2. Estes intervalos representam o valor E_D calculado com $\pm 10\%$ do coeficiente de Poisson médio. Esta percentagem em termos práticos representa uma grande variação no valor final e por isso pode-se afirmar com alguma confiança, assumindo que o processo de determinação foi válido, que o intervalo de $\pm 10\%CP$ é representativo das propriedades elásticas do sal-gema do diapiro de Loulé.

No livro *Rock Mechanics in Salt Mining* é referido que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade com base na expressão (8) são mais satisfatórios quando o sal-gema é homogéneo e isotrópico, ainda que se possam adequar a algum grau de anisotropia. Com efeito, o sal-gema de Loulé apresenta uma certa heterogeneidade e ainda que o método usado possa não ser o mais adequado, os

resultados constituem uma aproximação do que é esperado encontrar se métodos mais satisfatórios forem empregues. Em comparação com os valores dos seis depósitos de sal-gema da Tabela 2, os valores dos resultados obtidos estão um pouco abaixo deles mas ainda assim relativamente próximos e na mesma ordem de grandeza. Por comparação pode observar-se também que o sal-gema do diapiro de Loulé é um pouco menos rígido que o dos outros depósitos, pois um valor E_D mais baixo indica menor rigidez.

Os gráficos 6 e 7 mostram a variação de E_D ao longo da mina, calculada para cada provete da série 1 e da série 2. Os dados dos gráficos são apenas os que foram determinados com o coeficiente de Poisson médio (0,34).

Gráfico 6 – Módulo de elasticidade dinâmico (MED) do sal-gema (Série 1).

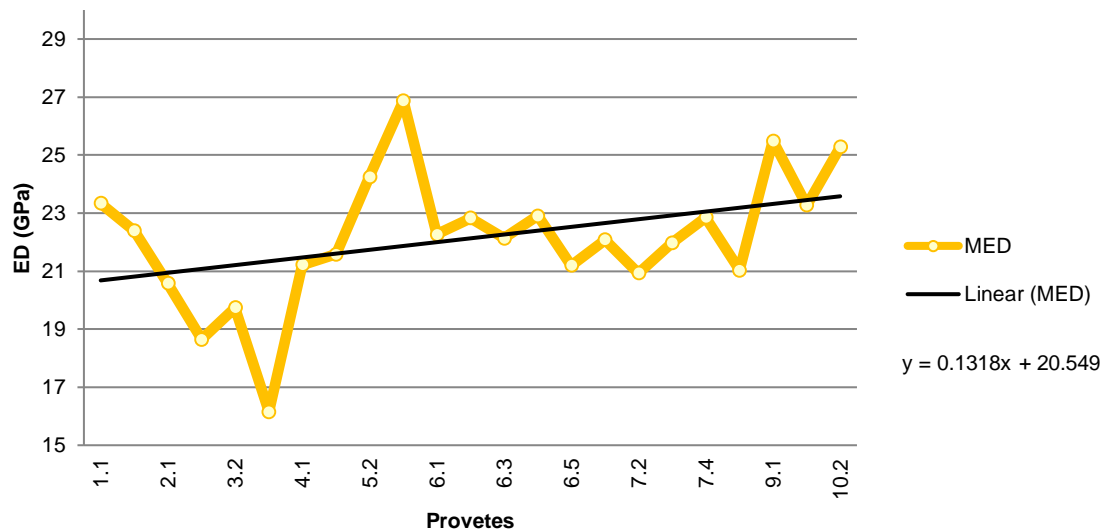
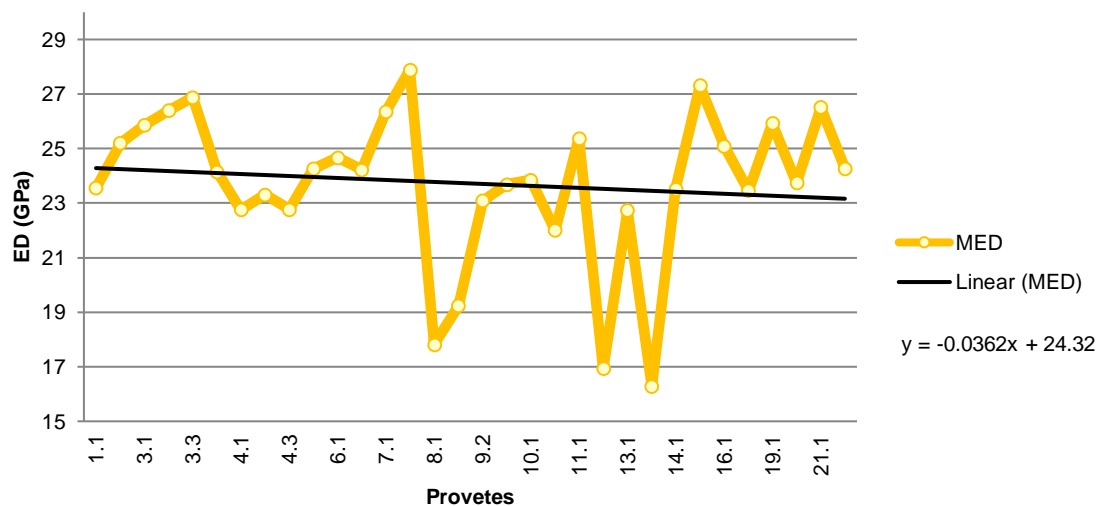


Gráfico 7 – Módulo de elasticidade dinâmico (MED) do sal-gema (Série 2).



Relação entre o módulo de elasticidade com a velocidade e com a resistência à compressão

Algo de nota é a semelhança que existe entre as linhas dos gráficos do módulo de elasticidade e da resistência à compressão das respetivas séries. Mas ainda mais semelhantes, quase idênticas, são as linhas dos gráficos do módulo de elasticidade e da velocidade de propagação das ondas das respetivas séries. A relação que existe entre estes parâmetros não é surpresa pois os três dependem de características intrínsecas semelhantes do sal-gema. Características que afetam positivamente os valores dos três parâmetros são a coesão e compactamento do sal-gema; e características que afetam negativamente os valores dos três parâmetros são a presença de defeitos (como fraturas, p. ex.) e de discontinuidades (como estratificação, p. ex.). A composição do sal-gema não parece ser um fator com muito peso nos resultados destes parâmetros. Os Gráficos 8 e 9 seguintes mostram essas relações para os resultados de cada série. Nos gráficos a velocidade das ondas e a resistência à compressão são apresentados em função do módulo de elasticidade. Neles pode-se observar que existe uma relação direta e muito próxima entre a velocidade e o módulo de elasticidade. Quando a velocidade aumenta, o módulo de elasticidade aumenta também. A relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade não é tão linear como a anterior mas em geral apresenta a mesma relação de crescimento mútuo dos valores de ambos os parâmetros.

Gráfico 8 – Gráfico de dispersão da velocidade das ondas (V) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MED) e da resistência à compressão uniaxial (RCU) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MED) (Série 1).

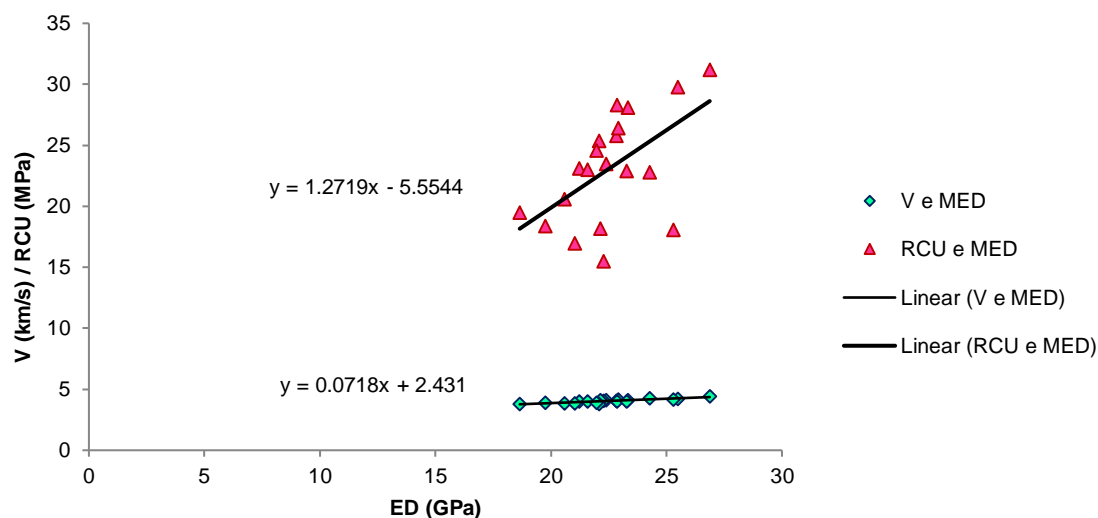
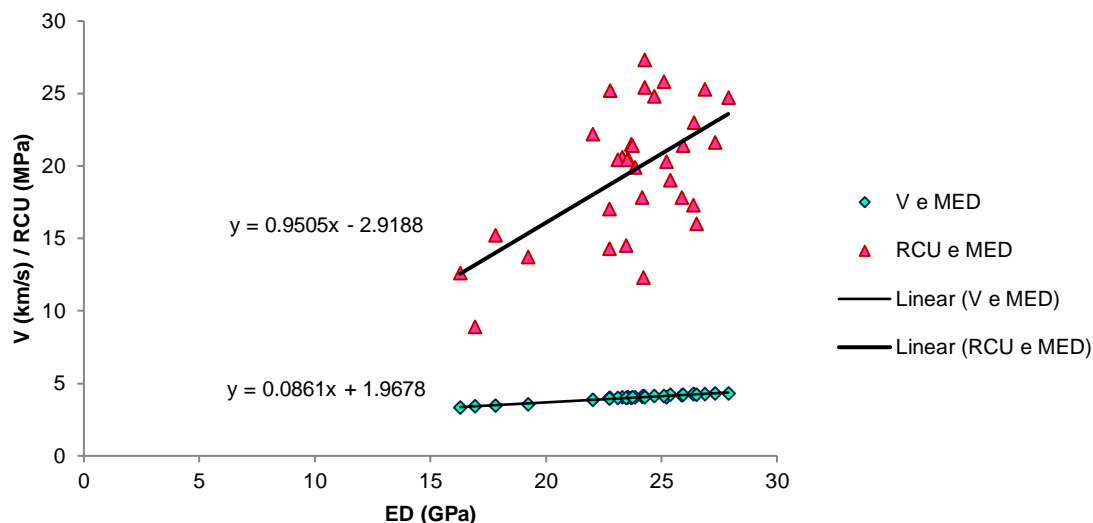


Gráfico 9 – Gráfico de dispersão da velocidade das ondas (V) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MED) e da resistência à compressão uniaxial (RCU) em função do módulo de elasticidade dinâmico (MED) (Série 2).



8.4 Resistividade Elétrica

A maioria dos valores dos dois gráficos para a resistividade elétrica encontram-se no intervalo de 0 a 20 $k\Omega \cdot m$. Casos de valores aparentemente anormais, como os dos três provetes da série 2 (14.1, 15.1, 16.1), devem-se ao valor da corrente elétrica (I) que atravessou os provetes ter sido muito baixa e por isso o valor do resultado é altíssimo quando a divisão é feita por um valor quase nulo. No caso desses três provetes, eles apresentam uma composição semelhante com baixa componente em argilito e um aspeto de sal-gema “seco”. A dificuldade de a corrente atravessar este tipo de sal-gema deve-se ao baixo teor de humidade natural que possui no seu interior. As diferenças nos teores de humidade presentes nos provetes entre as duas séries é a causa para os resultados da série 2 apresentarem valores de resistividade elétrica muito superiores aos da série 1. Como referido antes, na segunda fase os testes de resistividade foram executados no mesmo dia da serragem de cada provete e isso ajudou a manter baixos os teores de humidade naturalmente presentes no sal-gema.

Os provetes de sal-gema, mesmo embalados, absorvem sempre alguma humidade do ar e a influência dessa absorção adicional nos resultados da resistividade pode ser observada no Gráfico 10 da série 1. A verde-claro temos a linha dos valores medidos nos testes de resistividade alguns dias depois da serragem e a verde-escuro a linha dos valores de resistividade medida outra vez nos mesmos

provetes mas dez dias depois. Observa-se que o intervalo de valores caiu para mais de metade e provetes que mostravam uma resistividade mais alta passaram a ser menos resistentes. Ou seja, devido à presença de mais humidade no sal-gema, a corrente elétrica conseguiu atravessá-lo com maior facilidade. A queda na resistividade elétrica é maior nos provetes da zona sul (parte direita do gráfico) e isso deve-se à sua composição ser mais rica em argilito. Pois observou-se que o argilito absorvia mais facilmente a humidade do ar podendo até formarem-se gotas de água na superfície do sal-gema ao fim de algumas horas exposto (Fig. 47). A temperatura também influencia os resultados obtidos, mas nos dois dias em que foram realizados os testes de resistividade da série 1, a temperatura ambiente foi a mesma (16 °C). A percentagem de humidade relativa na atmosfera da sala também não variou significativamente entre as medições tendo sido registados os valores de 44% e 48% para o primeiro e para o segundo dia de testes, respetivamente. Na série 2 os testes foram realizados ao longo de duas semanas mas a temperatura ambiente da sala manteve-se constante nos 20 °C, só a percentagem de humidade relativa variou entre os 45% e os 55%.



Figura 47 – Pormenor de gotas de humidade condensada na superfície de um provete de sal-gema. (Crédito: Fotografia do autor)

É sabido que sal-gema tem um comportamento altamente resistivo à corrente elétrica e isso foi verificado pelos resultados obtidos em que a resistividade variou de 0,27 a 6,44 $k\Omega \cdot m$ no primeiro ensaio da série 1 e entre 0,16 e 102,1 $k\Omega \cdot m$ na série 2. Observando as linhas de tendência ao longo da mina, o sal-gema mostra uma tendência ascendente no que toca à sua resistividade elétrica, com exceção da linha de tendência do segundo dia de testes da serie 1 onde devido à maior percentagem em humidade a tendência tornou-se descendente. Sendo assim, a média obtida para a

resistividade elétrica da série 1 foi $3,02 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ e foi de $15,66 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ para a série 2. No geral, os resultados obtidos estão relativamente de acordo com a ordem de grandeza de valores determinados por Moreira (1985), que obteve resultados na ordem de 10^1 a $10^4 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ para a resistividade elétrica do sal-gema medida no interior da mina. A ordem de grandeza dos resultados aqui obtidos situa-se entre 10^0 a $10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$, que está a uma ordem de grandeza abaixo do intervalo anterior. É preciso notar que o teor de humidade presente no sal-gema da mina é muito inferior àquele que é encontrado nos provetes analisados em laboratório e isso pode explicar essa diferença na ordem de grandeza.

Gráfico 10 – Resistividade elétrica (RE) do sal-gema em dois ensaios com 10 dias de diferença (Série 1).

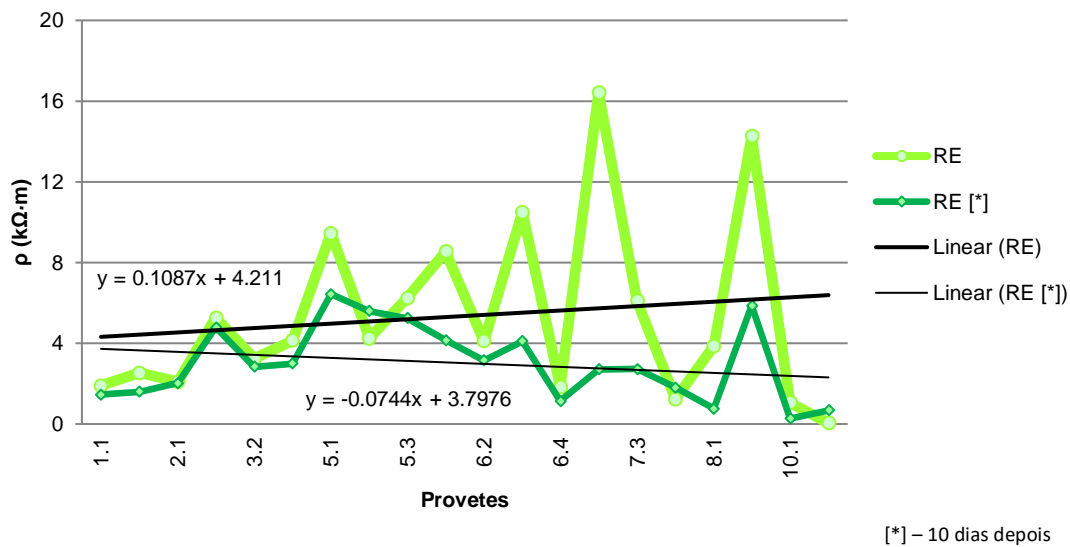
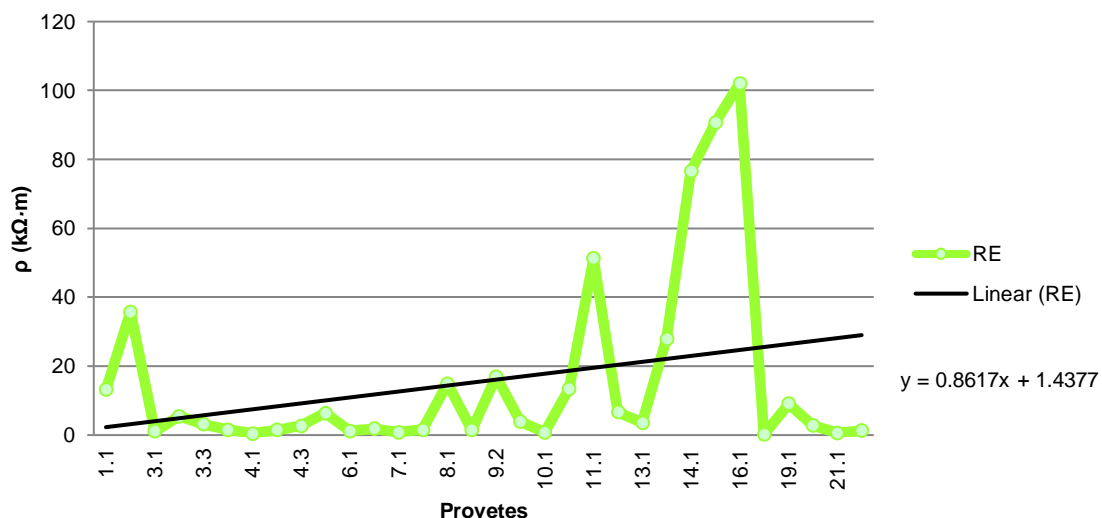


Gráfico 11 – Resistividade elétrica (RE) do sal-gema (Série 2).

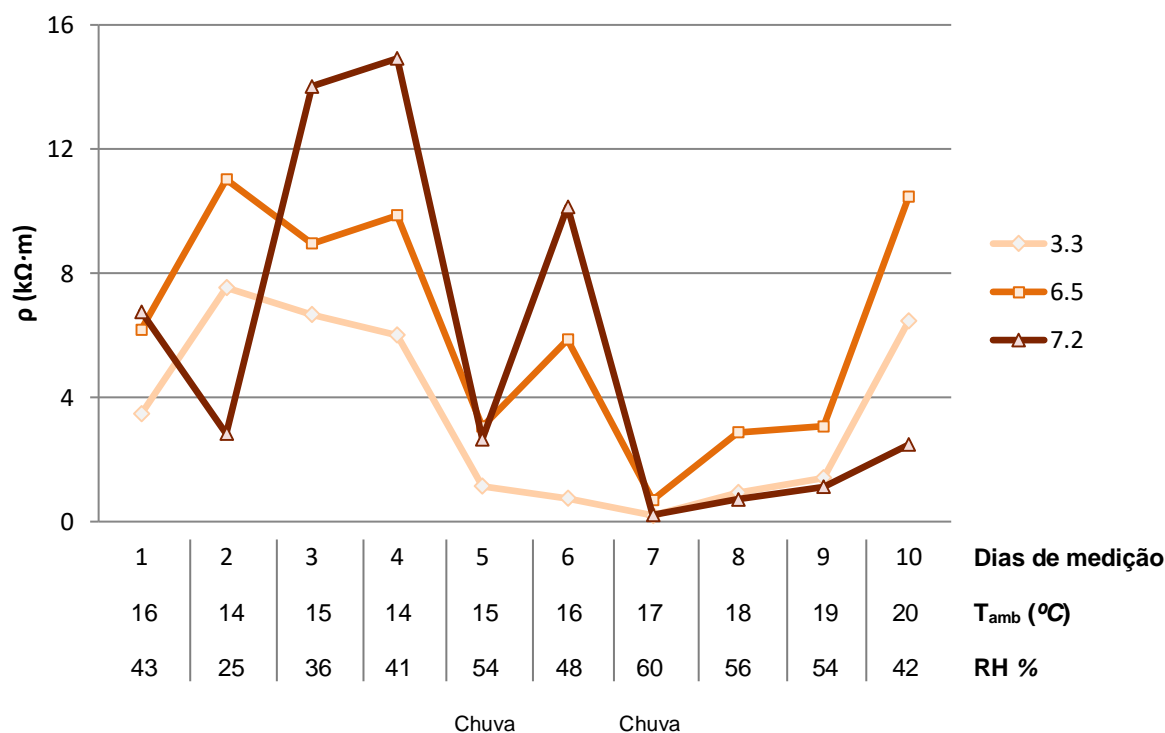


Teste de controlo da absorção da humidade:

No gráfico 12 estão apresentados os valores determinados para a resistividade elétrica em três provetes de composição mineralógica relativamente diferente (Fig. 44). Os três provetes ficaram expostos ao ar por um período de quatro semanas, com medições de resistividade elétrica efetuadas a cada dois ou três dias. Para ajudar na visualização, utilizaram-se cores para as linhas dos gráficos semelhantes à cor geral apresentada pela composição de cada um dos três provetes.

Através das linhas dos gráficos observa-se que sal-gema mais limpo (3.3), ou seja com menos quantidade de impurezas, é o menos resistente em geral, exceto quando os teores em humidade aumentam e nesse caso o provete com maior componente em argilito (7.2) torna-se o menos resistente. No geral e em comparação com os outros provetes do conjunto inteiro, os valores de maior resistência são observados em provetes com baixa componente em argilito e halite com mais impurezas, ou seja, halite com uma coloração mais escura e/ou alaranjada.

Gráfico 12 – Resistividade elétrica (RE) do sal-gema (Série 2).



No fundo do gráfico 12 são também apresentados os valores da temperatura ambiente (T_{amb}) e da percentagem da humidade relativa (RH) para cada dia. A percentagem da humidade aumentou significativamente nos dias 5 e 7 devido a ter ocorrido chuva nesses períodos e como tal verificou-se uma descida muito acentuada nos valores mediados da resistividade elétrica. A partir do dia 7, a humidade diminuiu e a temperatura aumentou e isso refletiu-se mais uma vez num aumento da resistividade. O intervalo de valores das medições é o mesmo intervalo onde se situam a maioria das medições do resto do conjunto de provetes (0 a 20 $k\Omega \cdot m$), mas esta experiencia mostrou como o fator humidade tem muita influência nos resultados obtidos para este parâmetro geofísico. Portanto é de grande importância fazer os possíveis para realizar os ensaios com as condições de humidade e temperatura naturais.

8.5 Resistência à Compressão Uniaxial

A força de compressão não depende tanto da composição do salgema mas mais da sua estrutura interna. Nesta escala de amostras a estrutura interna são os cristais de halite e essa é relativamente pouco variável entre os diferentes provetes de sal-gema de composição diferente. O que varia é a estrutura apresentada pelos constituintes do sal-gema. Os gráficos 11 e 12 mostram alguma variação nos valores da resistência à compressão mas no conjunto das duas séries a tendência linear apresenta-se com declive praticamente horizontal.

Gráfico 13 – Resistência à compressão uniaxial (RCU) dos provetes de sal-gema (Série 1).

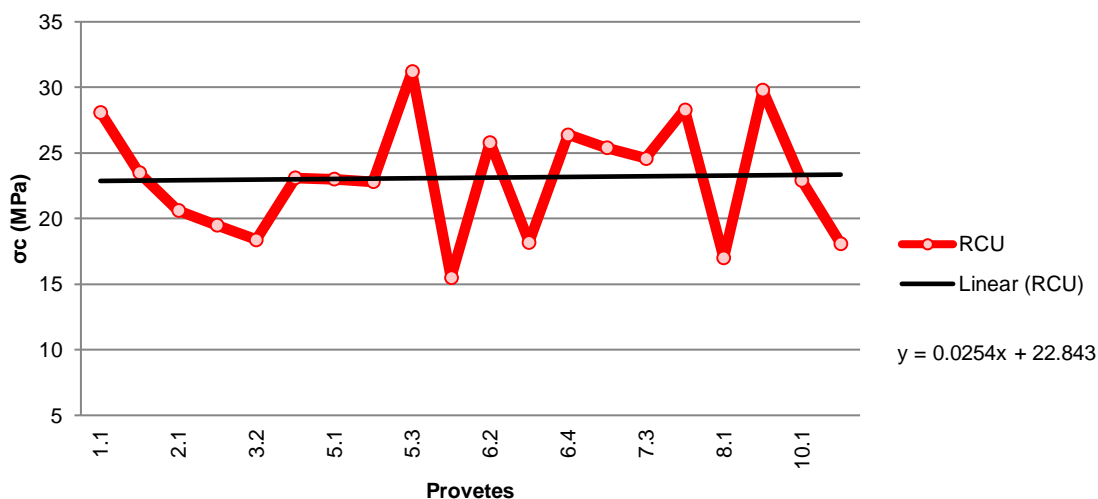
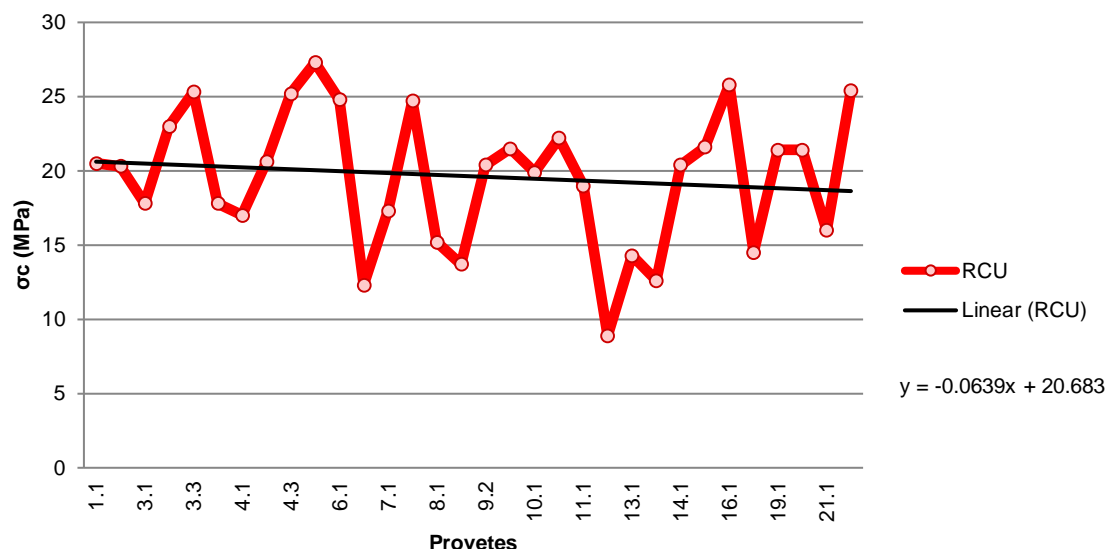


Gráfico 14 – Resistência à compressão uniaxial (RCU) dos provetes de sal-gema (Série 2).

O intervalo registado para os valores da série 1 foi de 15,5 a 31,2 *MPa* e 8,9 a 27,3 *MPa* para a série 2. A média calculada dos valores situa-se em 23,11 *MPa* para a série 1 e 19,6 *MPa* para a série 2.

Análise das fraturas:

Para entender um pouco o porquê da variação nos valores da resistência à compressão uniaxial (RCU), será feito de seguida uma descrição de alguns detalhes e relações detetados durante os ensaios. Todas as imagens apresentadas em seguida são fotografias do autor pertencentes à recolha fotográfica efetuada após os testes de compressão.

A primeira observação tem a ver com a estratificação ou bandado. Se as camadas que formam o bandado forem todas de halite, ainda que com coloração diferente, as fraturas são independentes da estratificação (Fig. 48^a). As exceções a esta observação são quando existem camadas com uma grande percentagem de cloreto de potássio (carnalite ou silvite) ou com argila, nesses casos essas camadas funcionam como pontos frágeis e o provete fratura por aí (Fig. 48b). Outros pontos frágeis que se encontraram foram pequenos veios vermelhos, com cloreto de potássio na sua composição, que agiam sempre como condutores de fraturas sempre que se

encontravam num provete (Fig. 49). Por sua vez, os furos que foram feitos nos provetes com a broca para os testes de resistividade elétrica não agiram como pontos frágeis.

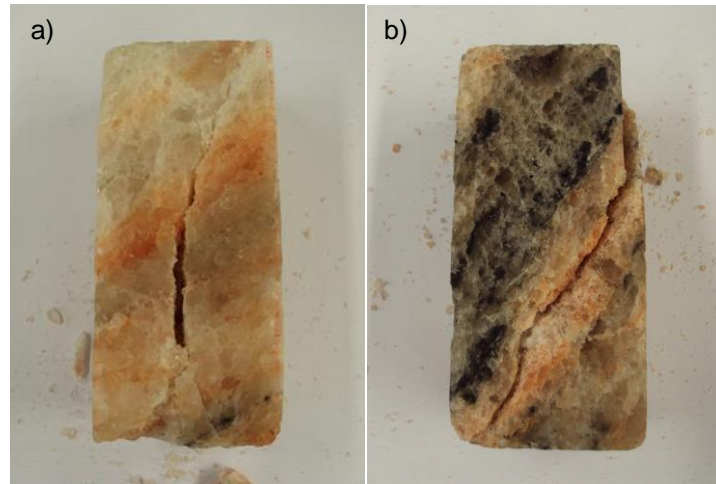


Figura 48 – Provete da série 1 onde é visível o comportamento dual que pode ocorrer na presença de estratificação;
a) Provete onde a fratura atravessou o bandado; **b)** Provete que fraturou pela camada de carnalite;

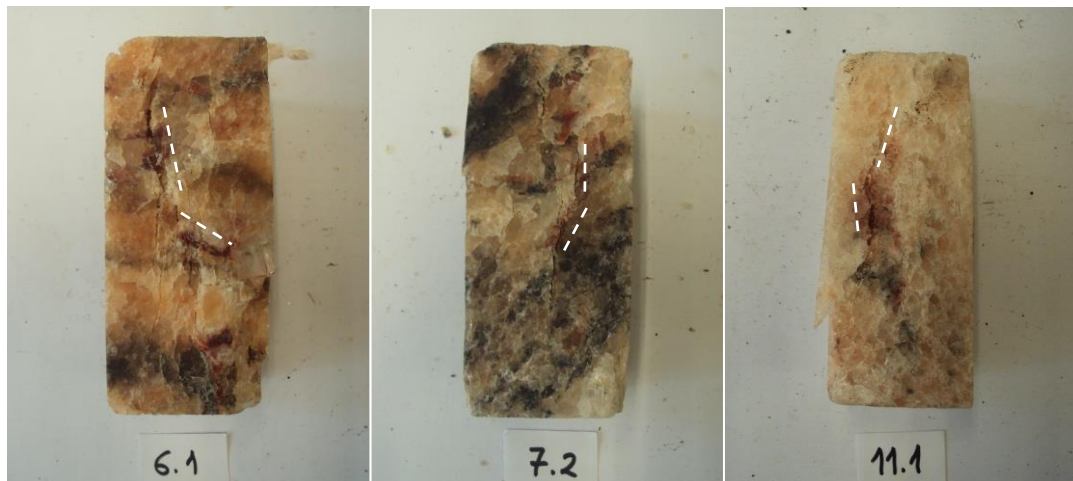


Figura 49 – Provete da série 2 onde estão presentes pequenos veios vermelhos que agiram como pontos frágeis de rutura.

Outros provetes com um aspecto mais granuloso ou brechificado com argilito (Fig. 50a e b) obtiveram valores baixos de RCU e partiram pelos planos de argilito. Outro aspeto que resultava em valores de RCU baixa é a existência de fraturas nos provetes antes de serem submetidos ao teste (Fig. 50d). Também se reparou que fraturas obliquas (ou rutura de corte) apareciam com mais frequência em provetes com

maior teor em argila/argilito (Fig. 50e e f), talvez por este conferir em geral uma menor coesão entre os constituintes quando comparado a um provete só com cristais de halite.

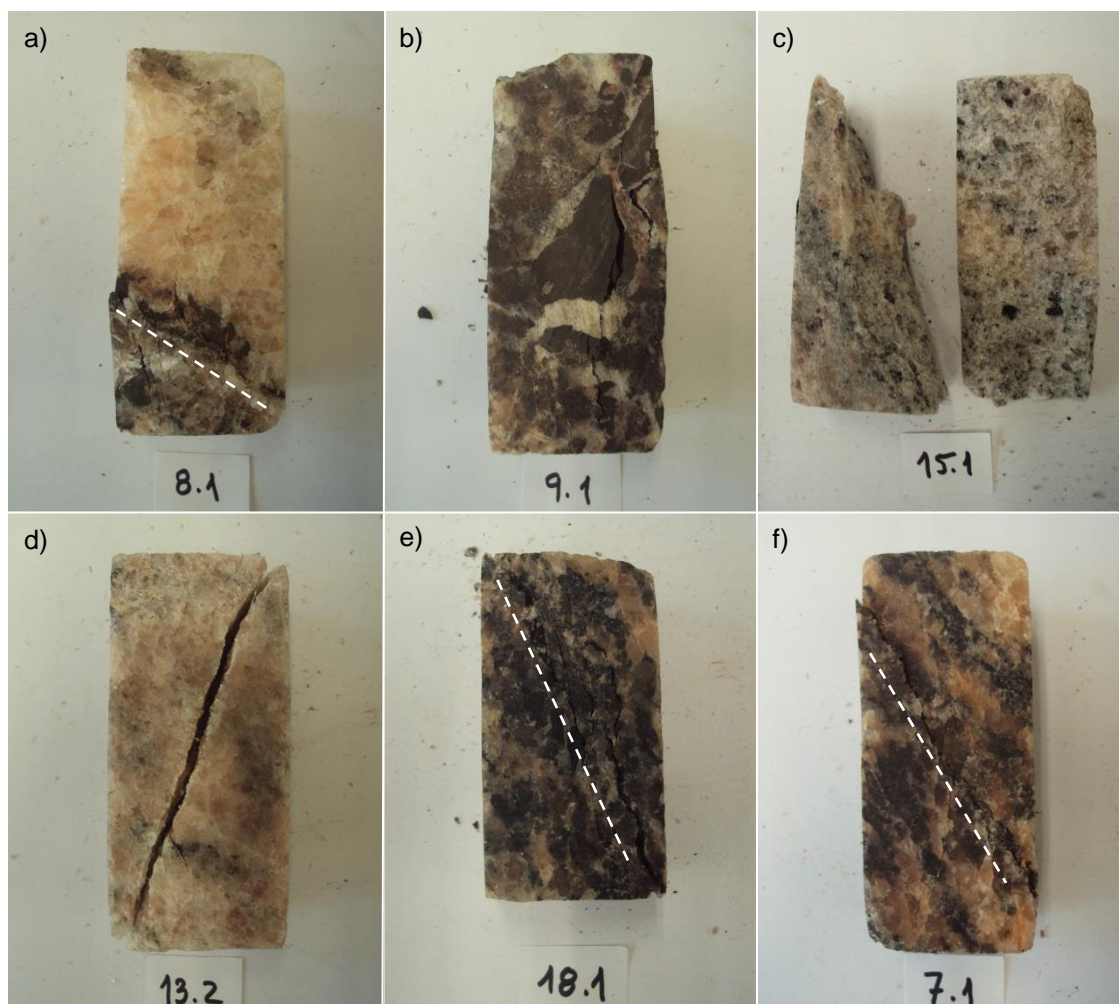


Figura 50 – Provete da série 2 que obtiveram baixos valores de RCU e cujas fraturas resultaram de vários aspetos; **a)** e **b)** A fratura ocorreu através de planos de argilito brechificado; **c)** Sal-gema com cristais e constituintes de aparência esmigalhada e com pouco coesão; **d)** A rutura ocorreu neste provete através de uma fratura já existente; **e)** e **f)** Fraturas oblíquas em provetes com um maior teor em argila/argilito; nota-se que são provetes de um sal-gema mais heterogéneo e em geral menos coeso.

Outro tipo de fraturas que se observam são fraturas verticais (ou rutura à tração) (Fig. 51a e b) que podem evoluir para fraturas com a forma de Y (Fig. 51c e f) com o aumento da carga exercida. Nesses casos estão quase sempre associadas a fraturamento em cone no interior do provete. Este fraturamento característico cria algo com a forma semelhante a dois cones no interior do provete, a apontar um para o outro, com a respetivas bases a corresponder às bases do provete (Fig. 51d e e). As

estruturas em cone são comuns nos ensaios deste género em sal-gema e resultam da força compressiva que é exercida em ambas as bases e aparentemente só aparecem se o provete aguentar razoavelmente a compressão e resultar num valor médio/alto de RCU. Ainda assim esta observação não é regra geral, provetes com elevado valor de RCU podem fraturar apenas verticalmente sem apresentar as estruturas características em cone, pois há muitos fatores envolvidos e não há dois provetes iguais. Este fraturamento observa-se em sal-gema de composição e aspeto diversificado.

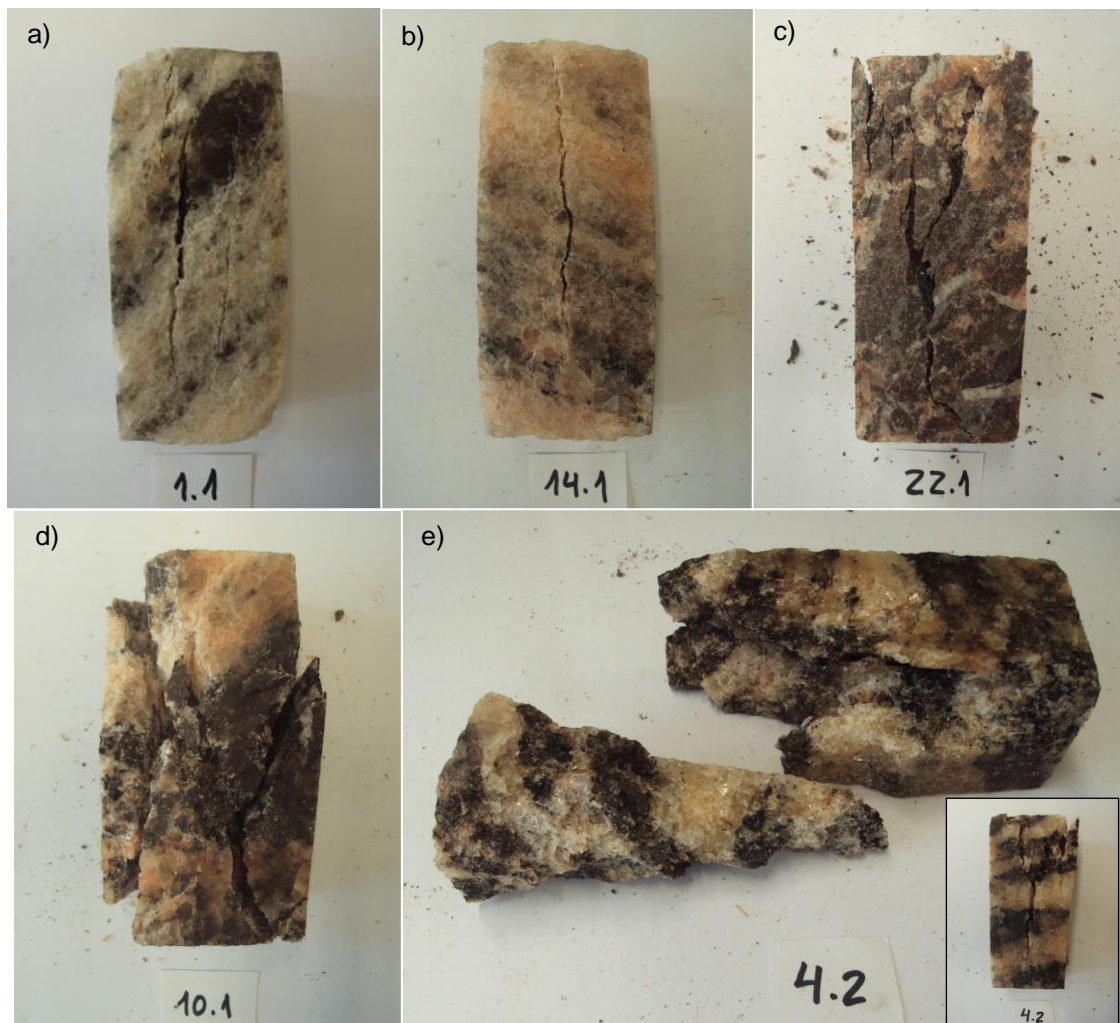


Figura 51 – Provetes da série 2 que obtiveram valores de RCU superiores a 20 MPa; **a)** e **b)** Fraturas verticais, não aparentando a formação de cones internos; **c)** Provete com fratura em Y, já apresentando a formação de um cone interno; **d)** Fraturamento em cone completo, as estruturas dos dois cones já são distinguidas; **e)** Pormenor do fraturamento interno em estrutura de cone de um provete que apresentava no exterior uma fratura em Y.

8.6 Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais, do inglês *Principal Component Analysis* (PCA), é de uma forma geral um procedimento matemático que utiliza uma transformação linear ortogonal num conjunto de dados, convertendo-os para um novo sistema de coordenadas. É uma análise que utiliza matrizes de valores próprios para revelar a variância que existe entre os dados transformados que funcionarão como variáveis. O conjunto de valores original é convertido num conjunto de variáveis linearmente não correlacionadas designadas por componentes principais.

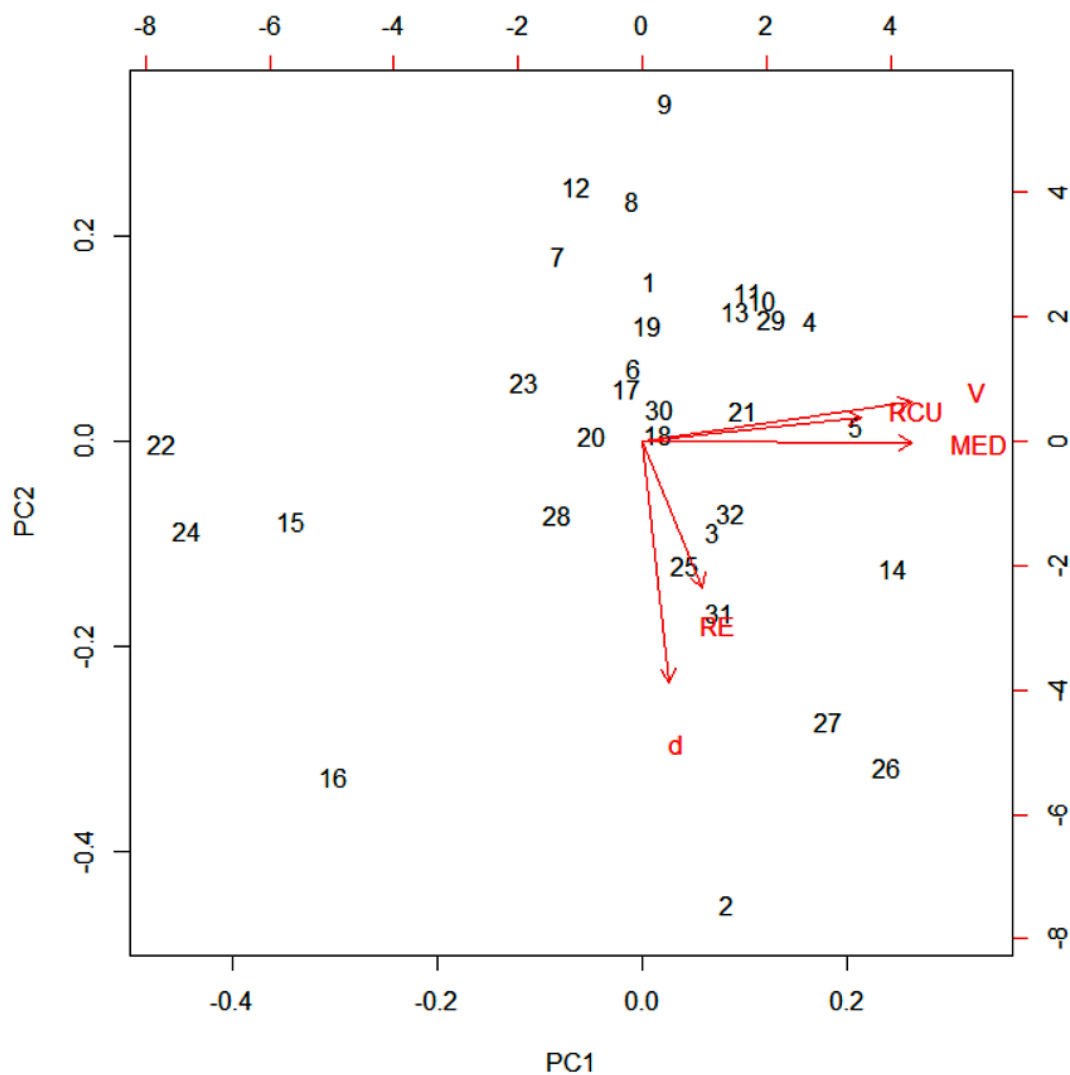
A PCA foi aqui realizada recorrendo ao *software* de utilização livre *R*, através de uma função que usa decomposição em valores singulares, que em geral fornece uma precisão numérica maior. O tipo da PCA realizada foi a de correlação que é aplicada em dados que foram normalizados para ter média 0 e desvio padrão igual a 1. A normalização serve para que todas as variáveis tenham o mesmo peso na análise evitando que uma ou mais variáveis dominem a análise. A PCA de correlação é adequada para casos como este em que as variáveis foram medidas em unidades diferentes ou mesmo quando a variância é muito diferente entre elas.

O Gráfico 13 é o resultado visual da realização da PCA sobre os dados da série 2 dos cinco parâmetros geofísicos estudados. As variáveis são projetadas numa escala de rotação e em função das duas primeiras componentes principais determinadas (PC1 e PC2) onde a variância é maior. Os parâmetros geofísicos estão assinalados por: *d* = densidade, *V* = velocidade, *MED* = módulo de elasticidade dinâmica, *RE* = resistividade elétrica, *RCU* = resistência à compressão. Cada parâmetro está representado por um vetor que aponta na direção de maior variância dessa variável. O ângulo entre os vetores indica o nível de correlação entre as variáveis, quanto maior o ângulo menor a correlação. Os algarismos dispostos no gráfico variam entre 1 e 32 por corresponderem ao conjunto de 32 provetes da série representada. Os eixos inferior e esquerdo representam os *scores* que são pontuações de componentes ou fatores que correspondem aos valores originais. Os eixos superior e direito representam os *loadings* que são os carregamentos ou o peso pelo qual cada variável normalizada tem de ser multiplicadas para se obter a pontuação de componente.

O significado da distribuição dos algarismos no gráfico interpreta-se da seguinte forma: provetes com valores próximos nas diferentes variáveis, isto é, com valores medidos semelhantes nos cinco parâmetros geofísicos encontram-se próximos uns dos outros. Os vetores partem do ponto de origem do referencial de coordenadas

e apontam na direção que possui a maior correlação múltipla quadrada com os componentes principais, sendo o seu comprimento proporcional a esse valor. Vetores que apontam na mesma direção correspondem a variáveis que obtiveram resultados próximos na análise e por isso encontram-se correlacionadas.

Gráfico 15 – Gráfico da projeção da Análise de Componentes Principais realizada sobre os resultados dos provetes da série 2 para os cinco parâmetros geofísicos estudados. O gráfico foi obtido através do *software R*.



Assim temos que V, RCU e MED são variáveis bem correlacionadas, como já tinha sido detetado anteriormente e cujas variâncias apontam relativamente na mesma direção. A quase ortogonalidade entre os ângulos de RE e d com as outras três variáveis indica que não estão correlacionadas com elas, mas a proximidade entre os

vetores das duas indica algum tipo de correlação na sua variância. Uma possível relação entre as duas já foi mencionada anteriormente no capítulo dos métodos de caracterização geofísica onde se disse que a resistividade elétrica e a densidade admitiam-se como inversamente proporcionais. Pode-se dizer que o que divide e relaciona os parâmetros geofísicos em dois grupos têm a ver com a sua essência: sendo V, MED e RCU mais relacionados com as propriedades físicas e RE e d mais relacionados com as propriedades químicas.

Não se realizou uma PCA para os dados da série 1 porque os ensaios da RE e da RCU foram feitos com três provetes a menos (os provetes de controlo da humidade) que os ensaios de d, V e MED. E também porque os dados da segunda série são mais rigorosos e representam melhor as variações do sal-gema do que os dados da primeira série. Mas como se observou nos resultados obtidos nos parâmetros estudados as duas séries apresentam valores próximos e por isso as mesmas correlações iriam manifestar-se. A maior diferença que poderia haver entre os gráficos obtidos da PCA de cada uma seria a direção em que os vetores apontariam pois a variância dos dados é um pouco diferentes entre as duas séries.

Uma tabela com os principais dados da PCA, efetuada através do *software* R, encontra-se na Tabela A13 do Apêndice A.

9. Conclusão

A exploração mineira do sal-gema do diapiro de Loulé criou uma excelente oportunidade de observação e estudo da estrutura interna e do comportamento mecânico de um diapiro que foi largamente afetado pela compressão Alpina. Este estudo teve o objetivo principal de caracterizar mecanicamente o sal-gema da mina subterrânea Campina de Cima, no interior do diapiro de Loulé, através de ensaios laboratoriais focados nos cinco parâmetros geofísicos aplicados neste trabalho. Já com os resultados obtidos, podem então tirar-se algumas conclusões acerca do comportamento do sal-gema ao longo do eixo N-S da mina. Os pares de valores apresentados correspondem respetivamente aos obtidos na série 1 e série 2 de resultados.

O sal-gema apresenta uma densidade relativamente constante ao longo da mina com valores de densidade média de $2,10 \text{ g/cm}^3$ e $2,26 \text{ g/cm}^3$, sendo que estes valores são aproximadamente semelhantes à densidade da halite, o seu componente principal.

A maioria das variações apresentadas nos valores da velocidade de propagação de ondas ultrassónicas deviam-se a defeitos ou descontinuidades existentes no sal-gema dos provetes e entre os seus constituintes. Mas observando o intervalo de resultados, ele mostra-se relativamente constante no início e no fim. Além disso a velocidade de propagação média das ondas foi praticamente igual nas duas séries, situando-se nos $4,0 \text{ km/s}$.

O estudo da anisotropia concluiu que na maioria das vezes o sal-gema demonstra um comportamento anisotrópico para a velocidade de propagação das ondas, com a velocidade a propagar-se de forma igual em duas das três direções ortogonais e com velocidade diferente na terceira direção.

Os valores teóricos obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico foram de $22,13 \text{ GPa}$ e $23,72 \text{ GPa}$. Os valores são da mesma ordem de grandeza que os valores dos outros seis depósitos de sal-gema usados como referência ainda que relativamente mais baixos. Por isso pode dizer-se que o sal-gema do diapiro de Loulé é um pouco menos rígido em comparação com a média dos outros depósitos. Verificou-se também que existe uma relação muito próxima na variação do módulo de elasticidade com a variação de dois outros parâmetros geofísicos: a velocidade de propagação das ondas e a resistência à compressão uniaxial. A relação demonstrada é proporcional, quando um parâmetro aumenta, o outro aumenta também. A

proximidade com a variação da velocidade de propagação das ondas mostrou-se muito maior em comparação com a relação demonstrada com a resistência à compressão uniaxial.

Nos ensaios da resistividade elétrica foi mostrada alguma disparidade no intervalo de valores obtido entre as duas séries, mas isso deveu-se à diferença no teor de humidade relativa presente nos provetes de sal-gema testados em cada série. Como se concluiu pelo teste de controlo da absorção da humidade, a resistividade elétrica é fortemente influenciada pelos níveis de humidade presente no sal-gema. Os valores médios obtidos para a resistividade elétrica do sal-gema foram $3,02 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$ e $15,66 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$. Apesar dos dois intervalos de resultados serem um pouco diferentes, a grande maioria dos valores dos dois conjuntos situa-se no mesmo intervalo: desde 0,1 até $20 \text{ k}\Omega \cdot \text{m}$; o qual já é suficiente para concluir o carácter altamente resistivo apresentado pelo sal-gema. Por isso dependendo do teor de humidade presente no sal-gema, este será o intervalo de maior confiança onde se espera encontrar o valor da sua resistividade elétrica em ensaios no laboratório, podendo atingir valores mais elevados em ensaios no interior da mina.

Os resultados de resistência à compressão uniaxial mostram alguma variação ao longo da mina mas neste tipo de ensaio as variações já são esperadas mesmo em testes com o mesmo sal-gema. Ao analisar a tendência do intervalo de valores esta mostra-se relativamente constante. Seja qual for o resultado, dentro do intervalo apresentado, conclui-se que o sal-gema é muito resistente à compressão uniaxial apresentando valores médios de $23,11 \text{ MPa}$ e $19,6 \text{ MPa}$. Ao analisar as fraturas apresentadas pelos provetes de sal-gema conclui-se que o tipo de rutura mais característico é a fraturação em estrutura de cone, seguido por fraturas verticais e fraturas oblíquas. Além disso zonas de menor resistência funcionam quase sempre como pontos frágeis, nomeadamente zonas com argilito e cloreto de potássio.

A análise de componentes principais comprovou o que já tinha sido mostrado pelos resultados individuais, que entre os cinco parâmetros geofísicos, a velocidade, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade apresentam uma correlação próxima na sua variação no sal-gema ao longo da mina. A densidade e a resistividade elétrica não se mostram correlacionadas com os três parâmetros anteriores mas demonstram uma correlação próxima uma com a outra. Isso pode ser explicado pelas propriedades intrínsecas de cada parâmetro, as propriedades dos três primeiros estão mais relacionadas com as características físicas e as propriedades dos dois últimos estão mais relacionados com as características químicas do sal-gema.

Assim resumindo, conclui-se que o sal-gema não é, relativamente, muito denso; que funciona como um excelente meio de propagação de ondas sísmicas; que é um material de rigidez intermédia, tendo um módulo de elasticidade próxima da do cimento, mas comparação o seu comportamento plástico torna o sal-gema mais estável; é altamente resistivo eletricamente e é também muito resistente à compressão. Apesar de alguma variação verificada nos parâmetros estudados nos provetes, quando aplicados a uma enorme extensão de massa de sal, essas variações são significativamente menores pois o aumento da escala reduz o ruído de informação. Portanto conclui-se que o comportamento mecânico do sal-gema ao longo do eixo N-S da mina é no geral relativamente constante nos parâmetros geofísicos estudados.

É preciso notar que estes resultados são referentes ao sal-gema observado ao longo do eixo N-S da mina e por isso podem não caracterizar a totalidade do diapiro. Mas admite-se que a caracterização de 1,15 km de sal-gema é uma aproximação muito representativa de todo o diapiro.

Outro aspeto de nota deve-se a que os resultados obtidos são válidos apenas para trabalhos mecânicos executados nas primeiras centenas de metros do diapiro. Com o aumento da profundidade, as propriedades internas do sal-gema são alteradas pelo aumento da temperatura e da pressão a que fica sujeito. Além disso como as amostras recolhidas já se encontravam em descompressão, os resultados obtidos neste trabalho devem ser encarados como os valores mínimos para o comportamento mecânico do sal-gema.

O tema deste trabalho foi escolhido não só por interesse pessoal mas também por vontade de realizar um estudo numa área da geologia pouco conhecida no norte do país. O sal-gema é uma rocha sedimentar com características imensamente interessantes, muito diferente dos granitos e xistos que constituem a grande maioria do norte de Portugal. É portanto com boa vontade que se tenta transmitir o interesse pela investigação nesta área.

Assim, para terminar, serão dadas algumas recomendações de trabalho e de estudo para possíveis investigações futuras sobre o sal-gema.

A limpeza é um fator crucial para os equipamentos que entram em contacto com o sal, devido à facilidade com que este material possui em promover a formação de ferrugem, Por isso é algo que deve ser levado em consideração desde o início do trabalho prático. Recomenda-se a utilização de agentes de limpeza e de prevenção contra a corrosão nos equipamentos e maquinaria.

Para futuros trabalhos há alguns aspetos que poderiam colmatar o estudo do sal-gema aqui apresentado mas que não fizeram parte dos objetivos a desenvolver ou não houve disponibilidade para os realizar. Por exemplo: repetir os testes geofísicos mas com provetes de dimensão $10 \times 10 \times 25$ cm; reunir informação da composição química das diferentes mineralogias presentes no sal-gema e encontrar correlações com o seu comportamento mecânico; estudar a porosidade do sal-gema; fazer um mapeamento das estruturas da mina em falta, principalmente das zonas de cisalhamento; fazer um zonamento do sal-gema ao longo do eixo N-S da mina e caracterizar individualmente o comportamento mecânico do sal-gema nas diferentes zonas.

Todo o percurso que levou à conclusão deste trabalho foi uma experiência deveras interessante. A oportunidade de desenvolver várias técnicas ao longo do estudo mostrou-se extremamente enriquecedora, principalmente nas áreas da geologia e da geofísica. O ato de colocar o conhecimento em prática continua a não ter igual no campo da aprendizagem. Os sentimentos que permanecem no final de toda esta experiência são de grandiosidade interior e profunda gratidão.

10. Referências Bibliográficas

- Aguiar, M.A., (1964). *Estudo estrutural do diapiro de Loulé*. CLONA, Empresa Mineira de Sais alcalinos, artigo não publicado.
- Almeida, C., (1985). *Hidrogeologia do Algarve Central*. Tese de doutoramento
- Barreto, P., Silva, C., Leonardo, P., Sousa, J., Caeiro, M.H., Maciel, C. & Guerreiro, L., (2015). *The relationship between the onshore and offshore structure of São Marcos–Quarteira Fault System, Algarve Basin, Portugal*. Abstract, AAPG European Regional Conference and Exhibition, 18–19 May, Lisboa, Portugal.
- Carlou, E., (1980). *L'étage Callovien dans le cenrrre-Ouest de la France*. *Tbêse Uniu. Poitiers*, nº 325 , 4 vol.
- Choffat, P., (1887). *Recherch es sur les terrains secondaires au Sud du Sado*, Com. Comissão Trav. Geol. Portugal, Lisboa, r. I, fase. II, pp. 222-312.
- Davinson, I., Barreto, P. & Andrade, A., (2016). *Loulé: the anatomy of a squeezed diapir, Algarve Basin, Southern Portugal*. *Journal of the Geological Society*, publicado a 22 Setembro 2016.
- Dias, R., Araújo, A., Terrinha, P. & Kullberg, J.C, (2006). *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*, Cap.: A Bacia do Algarve: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. Universidade de Évora, pp. 247-316
- Fernandes, P. & Rosendahl, S., (ano desconhecido) *Breves Apontamentos sobre a geologia e paleontologia da parte central da Bacia Algarvia*.
- Kullberg, J., Pais, J. & Manuppella, G., (1992). *Aspectos gerais da tectónica Alpina*. *Ciencias da Terra (UNL)*, Lisboa, nº11, pp. 293-302, 2 figs, 2 quad.
- Lopes, C., (2002). *Análise e modelação da Bacia do Algarve*. Tese Doutoramento Univ. Nova Lisboa.

- Machek *et al.*, (2014). *Intrusion of lamprophyre dyke and related deformation effects in the host rock salt - A case study from the Loulé diapir Portugal*. *Tectonophysics*, 629, 165-178
- Manuppella, G., (1988). *Litoestratigrafia e Tectónica da Bacia Algarvia*. In *Geonovas (Lx)* vol. 10:67-71, 1988.
- Manuppella, G., (1992). *Notícia explicativa da carta geológica da região do Algarve (escala 1/100000)*, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Manuppella, G., Ramalho, M., Antunes, A. & Pais, J., (1987). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000, Notícia Explicativa da Folha 53-A (Faro)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Marques, B., (1983). *O Oxfordiano-Kimmeridgiano do Algarve oriental: estratigrafia, paleobiologia (Ammonoidea) e paleobiogeografia*. Tese Doutorado Univ. Nova Lisboa, 547 p.
- Marques, B., (1983). *O Oxfordiano-Kimmeridgiano do Algarve oriental: estratigrafia, paleobiologia (Ammonoidea) e paleobiogeografia*. Tese Doutorado Univ. Nova Lisboa.
- Martins, L.T., Madeira, J., Youbi, N., Munhá, J., Mata, J. & Kerrich, R., (2008). *Rift-related magmatism of the Central Atlantic Magmatic Province in Algarve, Southern Portugal*. *Lithos*, 101, 102–124.
- Matias, H.C.R.C. & Kress, P. et al., (2011). *Salt tectonics in the western Gulf of Cadiz, southwest Iberia*. *AAPG Bulletin*, 95, 1667–1698.
- Matias, H.C.R.C., (2007). *Hydrocarbon potential of the Algarve Basin*. Tese de Doutorado, Universidade de Lisboa.
- McHone, J.G., (2000). *Non-plume magmatism and rifting during the opening of the central Atlantic Ocean*. *Tectonophysics*, 316, 287–296.

- Moreira, J., (1985). *Relatório preliminar do estudo geoelectrico efetuado na área do diapiro de Loulé*. Direção-Geral de Geologia e Minas, Serviço de Fomento Mineiro.
- Moura, D. & Boski, T., (1999). *Unidade litostratigráficas do Pliocénico e Plistocénico no Algarve*. Comum. Inst. Geol. e Mineiro, Lisboa, t. 86, pp. 85-106.
- Mouterde, R., Rocha, B., Ruget, C. & Tintant, H., (1979). *Facies, biostratigraphie e paléogéographie du Jurassique portugais*. Ciênc. Terra, Lisboa, nº 5, pp. 29-52, Fig. 1-20.
- Oliveira, J. (Coord.), (1987–1988). *Carta Geológica de Portugal. Folha 8. Escala 1/200 000*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Oliveira, J. (Coord.), (1992). *Carta Geológica de Portugal. Escala 1/200 000. Notícia explicativa da folha 8*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Palain, C., (1976). *Une série détritique terrigène, les 'Grès de Silves': Trias et Lias Inférieur du Portugal*. Memórias dos Serviços Geológicos de Portugal.
- Palain, C., (1979). *Connaissances stratigraphiques sur la base du Mésozoïque portugais*. Ciências da Terra (UNL), 5, 11–28.
- Pratsch, J. C., (1958). *Stratigraphisch-tektonische Untersuchungen im Mesozoikum von Algarve (Sudporrugal)*, Beih. zum Geol. Jahr., Hannover, heft 30, 123 p., 14 fig. 2 taf.
- Ramalho, M. M., (1988). *400 Milhões de anos de História do Algarve*. Anais da Câmara Municipal de Faro.
- Ramos, A., Fernandes, O., Terrinha, P., Munoz, J.A. & Arnaiz, A., (2014). *Mesozoic tectonic and paleogeographic evolution of the Gulf of Cadiz and Algarve basins: Implications for hydrocarbon exploration*. AAPG Search and Discovery Article, 10621.

- Ribeiro, C., *et al.*, (2017). *Non-halide sediments from the Loulé diapir salt mine: characterization and environmental significance*. 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April, 2017 in Vienna, Austria., p.17094.
- Rocha, B., (1976). *Estudo estratigráfico e paleontológico do Jurássico do Algarve Ocidental*. Ciênc. Terra; Lisboa, n.º 2, 178 p., fig. 1.1-6.7, 2 cartas h.t.
- Rocha, B., Marques, B., (1979). *Le Jurassique de l'Algarve (Portugal) : esquisse stratigraphique et évolution paleogéographique*. Cuad. Geol., Granada, r, 10, pp. 35-43.
- Rocha, R., (1976). *Estudo estratigráfico e paleontológico do Jurássico do Algarve Ocidental*. Ciências da Terra (UNL).
- Terrinha, P. *et al.*, (2006). *A Bacia do Algarve: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica*. Geologia de Portugal. Universidade de Évora, pp.247-316.
- Terrinha, P., (1998). *Structural geology and tectonic evolution of the Algarve Basin, South Portugal*. Tese PhD, Imperial College, Univ. London.
- Terrinha, P., (1989). *The internal structure of the Loulé Diapir, Algarve Basin, South Portugal*. Tese MSc, Imperial College University of London.
- Terrinha, P., Coward, M. & Ribeiro, A., (1990). Salt Tectonics in the Algarve Basin: the Loulé Diapir. *Comun. Serv. Geol. Portugal*, t.76, pp. 33-40
- Zong, J., Stewart, R., Dyaur, N. & Myers, M., (2015). *Elastic properties of rock salt: Lab measurements and well log analysis in the Gulf of Mexico*. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015: pp. 3095-3099.

Apêndice A

Tabelas de dados dos parâmetros geofísicos

Tabela A2 – Dados do estudo da densidade do sal-gema (Série 2).

Amostrs	1.1	1.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	5.1	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1	9.1	9.2	9.3	10.1	10.2	11.1	12.1	13.1	13.2	14.1	15.1	16.1	18.1	19.1	20.1	21.1	22.1	
Medidas laterais (cm)																																	
A	Topo																																
	50.0	48.5	49.8	49.3	47.5	48.4	50.5	50.0	50.0	49.0	49.0	50.3	49.7	48.0	48.0	52.6	48.0	50.7	50.7	51.0	49.3	49.0	50.2	50.4	51.0	49.4	49.0	49.0	50.0	50.2	48.0	49.5	
	50.3	49.4	50.5	49.3	49.0	49.0	49.6	50.5	49.5	49.4	49.6	50.5	50.0	51.3	51.5	53.0	48.3	51.8	51.8	51.0	52.0	48.5	50.4	51.5	51.3	50.0	50.4	50.5	48.3	50.5	50.0	48.5	50.5
	49.0	46.0	49.0	51.0	50.0	48.5	50.2	50.0	50.0	48.2	49.0	50.8	48.0	49.0	51.0	52.0	47.8	51.7	50.0	51.0	48.0	50.0	50.5	51.0	50.0	49.6	50.7	47.4	50.0	49.8	47.0	51.0	
B	Base																																
	124.7	125.4	124.6	124.4	124.0	124.5	124.0	124.0	124.0	124.0	125.0	123.6	124.0	124.0	124.0	123.7	124.5	126.0	125.0	125.0	124.0	125.0	125.0	124.0	124.0	123.0	96.6	99.2	124.0	124.7	99.0	124.8	
	50.5	47.0	49.4	49.0	50.0	48.0	49.0	50.8	50.4	48.6	51.8	50.0	51.0	51.5	47.0	50.0	48.5	50.3	50.0	50.0	49.0	48.4	50.0	51.0	49.0	48.0	49.0	47.3	50.0	48.0	49.0	50.3	
	50.2	50.0	50.7	50.2	50.5	48.6	50.0	51.6	49.8	49.3	51.6	49.0	49.7	51.3	50.0	51.6	49.3	49.0	50.0	50.2	50.5	49.4	50.4	49.0	49.4	49.3	47.2	50.5	50.0	50.0	50.0	50.0	
C	Topo																																
	49.7	50.3	50.0	51.0	50.5	49.0	51.4	50.0	51.0	49.7	50.0	50.5	50.8	51.5	51.6	51.7	49.2	51.0	51.4	51.0	47.0	49.0	49.0	51.5	51.6	50.0	49.0	47.0	49.3	51.0	50.0	49.5	
	49.0	49.4	49.3	51.0	51.0	49.2	51.5	50.3	51.0	48.3	49.2	50.0	49.0	50.4	50.5	51.0	47.5	51.0	49.5	51.0	46.0	49.0	50.2	52.0	51.0	49.0	49.0	47.0	49.2	51.0	48.0	50.0	
	124.0	125.7	123.6	124.0	124.0	124.5	125.0	124.0	124.0	124.0	124.4	125.5	123.5	124.0	124.5	125.0	124.0	124.0	124.6	125.0	125.0	123.6	123.5	124.6	125.0	124.0	122.0	96.0	99.4	124.0	125.0	99.0	125.0
D	Base																																
	49.0	48.0	47.7	49.5	51.0	48.5	49.0	51.0	49.0	49.0	52.0	50.0	52.0	50.5	50.7	50.5	50.0	49.4	50.3	50.5	48.0	48.7	50.7	51.6	50.0	48.0	51.0	47.0	49.6	50.0	49.3	49.3	
	49.6	50.8	50.0	49.5	51.5	50.8	50.5	50.7	49.0	49.6	51.8	49.8	52.0	51.0	50.3	51.0	50.0	51.0	50.6	51.0	46.0	50.0	51.6	51.8	51.3	46.5	51.6	46.0	46.0	50.6	49.0	50.0	
	124.0	124.8	124.7	124.0	123.6	124.2	125.0	124.0	124.0	123.8	124.5	125.0	123.4	124.5	124.4	124.0	124.0	124.0	124.5	125.0	124.0	123.0	125.0	125.0	124.0	122.7	96.0	99.3	124.0	124.4	99.0	125.5	
E	Peso (g)																																
	675.0	689.9	694.4	698.0	701.7	670.5	695.9	695.9	674.7	671.9	708.0	671.9	703.1	728.6	701.9	755.4	670.6	717.5	706.2	722.1	650.1	670.6	700.2	722.6	699.2	669.6	543.6	514.4	692.9	705.6	541.0	712.9	
F	K																																
	49.5	47.4/5	49.1/5	49.9/5	49.3/5	48.5/5	50.7	50.0/5	50.4/5	48.8/5	49	49.9	49.3/5	49.7/5	49.9/5	51.7/5	48.1/5	50.3/5	50.3	51	48.0/5	49.5	49.9/5	51.1	50.6/5	49.1/5	49.1/5	49.3	47.6	49.8	50.5	48.2/5	49.7
	49.4/5	46.8	49.4/5	49.9/5	50.2/5	48.3/5	49.6	50.0/5	49.3/5	48.3/5	51.5/5	49.4/5	51.0/5	50.6/5	50.6/5	50	49.8/5	51.0	50.6	50.1/5	50.1/5	48.1/5	49.8/5	50.4/5	49.1/5	48.6	49.6/5	47.5	50.1/5	49.3/5	46.1/5	49.8/5	
	124.1/5	125.5/5	123.9/5	124.3/5	124.3/5	124.1/5	124.5	124.1/5	123.9/5	124.1/5	125.0/5	123.6/5	124.3	124.4/5	124.6	124.0/5	124.2/5	124.2/5	124.5	124.5	124.9	123.9	123.9/5	124.9	124.5	124.1	122.6/5	97.4	99.2/5	123.7/5	98.9	124.9/5	
G	L																																
	303.799	290.814	301.317	310.409	307.408	297.212	313.083	314.726	306.603	299.811	315.654	305.206	313.146	313.499	309.633	321.134	298.539	315.535	314.372	319.291	292.613	298.553	311.002	321.119	312.715	292.883	236.29	224.348	309.062	311.119	232.512	309.631	
	Volume (cm³)																																
	2,22187	2,37231	2,30485	2,24865	2,28264	2,25596	2,22274	2,21113	2,18631	2,24108	2,24296	2,20147	2,24528	2,32409	2,26688	2,35229	2,24627	2,27391	2,24638	2,26157	2,22171	2,24616	2,25144	2,25025	2,2359	2,28623	2,28125	2,29287	2,24195	2,26794	2,32676	2,30242	
H	Densidade média																																
		2,29291																															
I	Desvio Padrão																																
		0,04125																															

Tabela A3 – Dados do estudo da velocidade de propagação das ondas no sal-gema (Série 1).

[illegible]

Tabela A5 – Dados do estudo da anisotropia das velocidades de propagação das ondas nas direções ortogonais (X, Y e Z) nos cubos de sal-gema (Série 1).

Provetes	1.3	3.4	4.2	5.4	6.6	7.5	10.3
(cm)							
Lx	5,1	5,09	5,15	5,04	5,02	5,13	4,7
Ly	5,03	5,25	5,25	5,13	5,12	5,13	4
Lz	5,54	4,95	5,2	5,03	4,87	5	3,98
(us)							
tx	14,1	13,7	11,1	12,8	12,1	12,7	9,8
ty	12	15,7	12,9	13,4	12,1	13,2	9,8
tz	12,6	14,4	13,2	12,2	11,7	12,2	10,2
(km/s)							
Vx	3,61702	3,71533	4,63964	3,9375	4,14876	4,03937	4,79592
Vy	4,19167	3,34395	4,06977	3,82836	4,2314	3,88636	4,08163
Vz	4,39683	3,4375	3,93939	4,12295	4,16239	4,09836	3,90196
V médio	4,0685	3,49893	4,21627	3,96294	4,18085	4,00803	4,25984
Desvio Padrão	0,33005	0,15771	0,30406	0,1216	0,03618	0,08934	0,3861

Tabela A6 – Dados do estudo do módulo de elasticidade dinâmico do salgema (Série 1).

Provetes	1.1	1.2	2.1	3.1	3.2	3.3	4.1	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	7.1	7.2	7.3	7.4	8.1	9.1	10.1	10.2
Densidade (g/cm ^3)	2,12653	2,01135	2,1101	1,97065	1,97334	2,03073	2,03694	2,08529	2,05994	2,09752	2,08329	2,12244	2,03367	2,0378	2,07763	2,34606	1,98979	2,20822	2,18443	2,15721	2,19724	2,22315	2,20985
V médio (km/s)	4,10974	4,13873	3,87441	3,81648	3,92419	3,49948	4,00403	3,99119	4,25734	4,44061	4,05629	4,06892	4,09323	4,15906	3,96236	3,80625	4,02333	3,91385	4,01252	3,87377	4,22503	4,01379	4,196
MED (GPa)	23,3351	22,3837	20,5791	18,6486	19,743	16,1573	21,217	21,5815	24,2573	26,8722	22,2699	22,8299	22,1373	22,9014	21,1927	22,0823	20,9261	21,9767	22,8499	21,0315	25,4828	23,2695	25,2781
MED (GPa) +10%	19,8657	19,0557	17,5194	15,8759	16,8076	13,755	18,0625	18,3728	20,6507	22,8769	18,9588	19,4356	18,8459	19,4964	18,0418	18,7991	17,8148	18,7092	19,4526	17,9045	21,6941	19,8098	21,5198
MED (GPa) -10%	26,2266	25,1573	23,129	20,9593	22,1893	18,1593	23,846	24,2557	27,263	30,2019	25,0294	25,6588	24,8803	25,7391	23,8187	24,8185	23,5191	24,6999	25,6812	23,6374	28,6404	26,1528	28,4103

Coeficiente de Poisson (CP)		Média do MED médio (GPa)		Desvio Padrão		Min	Max
CP							
	0,34		22,1306	2,21845		16,1573	26,8722
CP +10%							
	0,374		18,8402	1,88861		13,755	22,8769
CP -10%							
	0,306		24,87275	2,49334		18,15934	30,20195

Tabela A7 – Dados do estudo do módulo de elasticidade dinâmico do sal-gema (Série 2).

Amostra	1.1	1.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	5.1	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1	9.1	9.2	9.3	10.1	10.2	11.1	12.1	13.1	13.2	14.1	15.1	16.1	18.1	19.1	20.1	21.1	22.1
Densidade (g/cm³)	2,2218653	2,37231	2,3045481	2,24865	2,28264	2,255983016	2,22274	2,21113	2,18631	2,24108	2,24296	2,20147	2,24528	2,32409	2,26688	2,35229	2,24627	2,27391	2,24638	2,26157	2,22171	2,24616	2,25144	2,25025	2,2359	2,28623	2,28125	2,29287	2,24195	2,26794	2,32676	2,30242
V médio (km/s)	4,0394728	4,04348	4,155850853	4,25014	4,25668	4,059210347	3,9892	4,02769	4,00382	4,08214	4,1146	4,11516	4,25099	4,29774	3,47781	3,54722	3,97769	4,00408	4,04249	3,67038	4,19242	3,40635	3,94234	3,33755	4,02386	4,28535	4,11483	3,96882	4,21881	4,01408	4,18819	4,028
MED (GPa)	23,5547199	25,1996	25,8592857	26,39	26,8714	24,1504891	22,7512	23,3044	22,7705	24,2629	24,6711	24,2212	26,361	27,8887	17,8135	19,2299	23,0906	23,686	23,8502	22,0104	25,3704	16,9329	22,7342	16,2854	23,5207	27,3157	25,0951	23,4646	25,9248	23,7419	26,5165	24,2703
MED (GPa) +10%	20,0530319	21,4534	22,01498664	22,4668	22,8767	20,56023289	19,3889	19,8399	19,3854	20,656	21,0035	20,6204	22,4421	23,7495	15,1653	16,3711	19,6579	20,1648	20,3046	18,7383	21,5988	14,4156	19,3545	13,8644	20,0241	23,2549	21,3644	19,9763	22,0708	20,2124	22,5745	20,6622
MED (GPa) -10%	26,4777429	28,3203	29,06170669	29,6581	30,1992	27,14129225	25,6897	26,1904	25,5904	27,2677	27,7264	27,2207	29,6255	31,3435	20,0196	21,6113	25,9502	26,6192	26,8008	24,7362	28,5123	19,0299	25,5496	18,3022	26,4335	30,6985	28,2028	26,3705	29,1354	26,6821	29,8003	27,2759

Coeficiente de Poisson (CP)		Média do MED médio (GPa)			Desvio Padrão			Min	Max
CP	0,34			23,7222		2,756755		16,2854	27,88967
CP +10%	0,374			20,19562		2,346931		13,86438	23,74354
CP -10%	0,306			26,65997		3,098152		18,30219	31,34353

Tabela A8 – Dados do estudo da resistividade elétrica do sal-gema (Série 1).

Amostras	1.1	1.2	2.1	3.1	3.2	4.2	5.1	5.2	5.3	6.1	6.2	6.3	6.4	7.1	7.3	7.4	8.1	9.1	10.1	10.2
A (m ²)	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
L (m)	0,15	0,125	0,125	0,15	0,1	0,125	0,125	0,125	0,15	0,125	0,15	0,125	0,1	0,1	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,1
D (m)	0,05	0,041	0,041	0,05	0,033	0,041	0,041	0,041	0,05	0,041	0,05	0,041	0,033	0,033	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,033
V/I Médio (kohm.m)	37,8607	41,6232	34,2303	105,352	42,6221	67,8707	155,108	69,5666	124,978	140,171	81,9964	172,275	24,2026	216,645	100,016	20,2804	63,4405	233,777	17,3187	0,53113
RE Média (kohm.m)	1,89304	2,538	2,08721	5,26758	3,22895	4,13846	9,45781	4,24187	6,24891	8,54699	4,09982	10,5046	1,83353	16,4125	6,09853	1,23661	3,86833	14,2547	1,05602	0,04024
Média da RE Média	5,35268		Min	Max																
Desvio Padrão	4,32485		0,04024	16,4125																
10 dias depois																				
V/I Médio (kohm.m)	29,0396	26,2842	33,3442	95,7028	37,3873	49,2327	105,618	91,8762	104,884	68,006	62,9337	67,2423	15,0629	35,6824	44,6384	29,6601	12,3506	96,2148	4,42283	8,96389
RE Média (kohm.m)	1,45198	1,6027	2,03319	4,78514	2,83237	3,002	6,44013	5,60221	5,24418	4,14671	3,14669	4,10014	1,14113	2,70321	2,72185	1,80854	0,75308	5,86676	0,26968	0,67908
Média da RE Média	3,01654		Min	Max																
Desvio Padrão	1,81426		0,26968	6,44013																

Tabela A10 – Dados do estudo da resistividade elétrica nos tês provetes de controlo da absorção da humidade pelo sal-gema (Série 1).

		V/I Médio			RE (kohm.m)		
		3.3	6.5	7.2	3.3	6.5	7.2
Medições							
1		56,9651	101,383	89,2038	3,47348	6,18186	6,75787
2		123,561	180,775	37,4317	7,5342	11,0229	2,83574
3		109,277	146,944	185,129	6,6632	8,95997	14,0249
4		98,5453	161,737	196,919	6,00886	9,86201	14,9181
5		18,6403	50,2135	35,0995	1,13661	3,0618	2,65905
6		12,3118	96,2061	133,833	0,75072	5,86623	10,1389
7		3,30359	11,4443	2,83633	0,20144	0,69783	0,21487
8		15,2793	47,0644	9,48852	0,93166	2,86978	0,71883
9		23,0353	50,2993	14,7308	1,40459	3,06703	1,11597
10		105,933	171,651	32,8127	6,45935	10,4665	2,48581
A (m^2)		0,0025	0,0025	0,0025			
L		0,125	0,125	0,1			
D		0,041	0,041	0,033			

Tabela A12 – Dados do estudo da resistência à compressão uniaxial do sal-gema (Série 2).

Provetes	1.1	1.2	3.1	3.2	3.3	3.4	4.1	4.2	4.3	5.1	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1	9.1	9.2	9.3	10.1	10.2	11.1	12.1	13.1	13.2	14.1	15.1	16.1	18.1	19.1	20.1	21.1	22.1
Fc (kN)	51.3	50.9	44.5	57.5	63.4	44.5	42.5	51.7	63.2	68.4	62.1	30.8	43.3	61.8	38.1	34.4	51.1	53.9	48.8	55.5	47.6	22.3	35.9	31.6	51	54.1	64.5	36.4	53.7	53.7	40.2	63.6
RCU (MPa)	20.5	20.3	17.8	23	25.3	17.8	17	20.6	25.2	27.3	24.8	12.3	17.3	24.7	15.2	13.7	20.4	21.5	18.9	22.2	19	8.9	14.3	12.6	20.4	21.6	25.8	14.5	21.4	21.4	16	25.4
Média de Fc	19,628125			Min	Max																											
Desvio Padrão	4,47641279			8,9	27,3																											

Tabela A13 – Dados da Análise de Componentes Principais efetuada através do *software* R (Série 2).

Rotação (n x k) = (5 x 5):					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
d	0.06063152	-0.843743184	-0.50618257	-0.1233748	0.113925984
V	0.60498913	0.136598461	-0.08171556	0.3446874	0.699887265
MED	0.60715206	-0.005625975	-0.15723829	0.3309118	-0.705059026
RE	0.13550577	-0.512232215	0.83445337	0.1513644	0.005722426
RCU	0.49327125	0.083814117	0.12674963	-0.8564785	-0.006140794

Importância dos Componentes (%):					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Desvio Padrão	1.5802	1.0169	0.9819	0.7099	0.02979
Proporção da Variância	0.4994	0.2068	0.1928	0.1008	0.00018
Proporção Cumulativa	0.4994	0.7062	0.8990	0.9998	1.00000